



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Autor del TFG:

Ortega Olivares, Jordi

Títol del TFG:

Estudi i caracterització de la resposta elèctrica d'elements piezoelèctrics davant diferents excitacions

Director del TFG:

Bernat Maso, Ernest

Co-director del TFG:

Gil Espert, Lluís

Convocatòria entrega TFG:

Juny 2017

Contingut d'aquest document: **Memòria**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Estudi i caracterització de la resposta elèctrica d'elements piezoelèctrics davant diferents excitacions

Escola Superior d'Enginyeries
Industrial, Aeroespacial i Audiovisual
de Terrassa

Grau en Enginyeries en Tecnologies Industrials

Autor: **Jordi Ortega Olivares**

Director del TFG: **Ernest Bernat Maso**

Juny 2017



Índex de continguts

1	Objecte de l'estudi.....	7
2	Abast.....	7
3	Justificació.....	8
4	Especificacions bàsiques	8
5	Estat de l'art	9
5.1	La piezoelectricitat.....	9
6	Campanya experimental	13
6.1	Preparatori.....	13
6.2	Muntatge	23
6.3	Característiques de les platines i circuit elèctric utilitzat.....	29
7	Resultats i discussió	39
7.1	Passos previs	39
7.2	Resultats.....	44
8	Conclusions	71
9	Anàlisi econòmic.....	73
10	Referències bibliogràfiques	73



Índex de Figures

Figura 1 Desplaçament del c.d.g. i polarització del piezoelèctric, creant una diferència de potencial. Fuente IIT Ciudad Juárez.....	9
Figura 2. Procés de polarització. Font: wikipedia.....	10
Figura 3. Dimensions de PI-876. Font: piceramic	11
Figura 4. Taula amb les diferents característiques dels models P-876. Font: piceramic	12
Figura 5. Peça 'C' i parts excèntrica	14
Figura 6. Dimensions [mm] disc excèntrica	15
Figura 7. Dimensions peça 'C'	16
Figura 8. Cargol de banc amb platina de poliestirè.....	17
Figura 9. Perforació de platina. Mesures de seguretat i passos a seguir	18
Figura 10. Metodologia pel correcte enganxat del transductor piezoelèctric	19
Figura 11. Metodologia per soldar els cables als borns del transductor piezoelèctric de la platina d'alumini	20
Figura 12. Mètode de l' extrem lliure	23
Figura 13. Mètode de l'excèntrica	24
Figura 14. Primera marca del transductor piezoelèctric	25
Figura 15. Muntatge sobre com col·locar el sergent sobre les platines	26
Figura 16. Metodologia en el mètode de l'extrem lliure.....	27
Figura 17. Platina cargolada amb la peça 'C' connectada a l'excèntrica	28
Figura 18. Metodologia en el mètode de l'excèntrica per la platina de poliestirè	29
Figura 19. Valor de les resistències segons el color de les bandes. Font: electronrtools	37
Figura 20. Circuit tipus utilitzat	38
Figura 21. Circuit equivalent	39
Figura 22. $V(t)$ sobre R_2	40
Figura 23. $P(t)$ sobre R_2	41
Figura 24. $V(t)$ sobre R_c càrrega	41
Figura 25. $P(t)$ sobre R_c càrrega. Potència mitjana = 9,789 μW . Energia total = 98,287 μJ	41
Figura 26. Excel per calcular les dades de potència i voltatge	42
Figura 27. Potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica.....	48
Figura 28. Potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica.....	50
Figura 29. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica.....	52
Figura 30. Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica.....	55
Figura 31. Potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica.....	57
Figura 32. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica.....	59
Figura 33. Potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada.....	62



Figura 34. Potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada.....	63
Figura 35. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada.....	65
Figura 36. Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada.....	67
Figura 37. Potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada.....	68
Figura 38. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada.....	70



Índex de Il·lustracions

Il·lustració 1. Representació mètode de l'extrem lliure en estat de repòs	30
Il·lustració 2. Representació mètode de l'extrem lliure al aplicar una força P a l'extrem de la platina .	31
Il·lustració 3. Càlcul de la fletxa per la platina d'alumini	32
Il·lustració 4. Càlcul de la fletxa per la platina de poliestirè	36
Il·lustració 5. Teorema de Tales	43
Il·lustració 6. Àrea varia segons si la funció augmenta o disminueix	44



Índex d'Equacions

Equació 1.....	21
Equació 2.....	22
Equació 3.....	22
Equació 4.....	22
Equació 5.....	32
Equació 6.....	33
Equació 7.....	33
Equació 8.....	33
Equació 9.....	33
Equació 10.....	33
Equació 11.....	33
Equació 12.....	33
Equació 13.....	34
Equació 14.....	34
Equació 15.....	34
Equació 16.....	34
Equació 17.....	34
Equació 18.....	34
Equació 19.....	34
Equació 20.....	35
Equació 21.....	35
Equació 22.....	35
Equació 23.....	35
Equació 24.....	35
Equació 25.....	35
Equació 26.....	35
Equació 27.....	44
Equació 28.....	45
Equació 29.....	45
Equació 30.....	45
Equació 31.....	46
Equació 32.....	46
Equació 33.....	53
Equació 34.....	53
Equació 35.....	53



Índex de taules

Taula 1. Llargada de les platines.....	30
Taula 2. Dades de l'Exemple	45
Taula 3. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'excèntrica	47
Taula 4. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina de poliestirè de longitud 1	48
Taula 5. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'excèntrica	49
Taula 6. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina de poliestirè de longitud 2	49
Taula 7. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'excèntrica	51
Taula 8. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina de poliestirè de longitud 3	51
Taula 9. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'excèntrica	54
Taula 10. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina d'alumini de longitud 1	54
Taula 11. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'excèntrica	56
Taula 12. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina d'alumini de longitud 2	56
Taula 13. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'excèntrica	58
Taula 14. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina d'alumini de longitud 3	58
Taula 15. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure.....	61
Taula 16. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure.....	63
Taula 17. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure.....	64
Taula 18. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure.....	66
Taula 19. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure.....	68
Taula 20. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure.....	69
Taula 21. Honoraris.....	73



1 Objecte de l'estudi

L'objectiu d'aquest estudi és determinar les condicions òptimes de les tensions mecàniques, vibracions, a les que estaran sotmesos els transductors piezoelèctrics del tipus PI-876.A12 per aconseguir la màxima resposta elèctrica possible. Els paràmetres que es buscarà optimitzar seran:

- Resistència de la càrrega.
- Longitud del voladís de la platina.
- Rigidesa del material de la platina sobre la qual s'enganxarà el transductor piezoelèctric.
- Mètode per generar vibracions: Mètode de l'extrem lliure o mètode de l'excèntrica.
- Amplitud o freqüència de les vibracions.

2 Abast

Durant l'estudi es realitzaran les següents tasques:

- ❖ Determinar experimentalment la resposta elèctrica de transductors piezoelèctrics sotmesos a diferents vibracions variant:
 - Resistència de la càrrega.
 - Ús de, com a màxim, quatre resistències de càrrega diferents per cada longitud de la platina.
 - Longitud del voladís de la platina.
 - Estudi de tres longituds diferents per cada platina.
 - Rigidesa (material) de la platina sobre la qual s'enganxarà el transductor piezoelèctric.
 - Estudi de dos materials diferents.
 - Mètode per generar vibracions
 - Mètode de l'extrem lliure o mètode de l'excèntrica.
 - Amplitud o freqüència de les vibracions.



- Ús de, com a màxim, quatre amplituds, o freqüències, diferents per cada longitud de la platina.

- ❖ Comparar els resultats obtinguts.
- ❖ Enteniment i discussió dels resultats.

3 Justificació

Cada vegada més, la societat busca fonts energètiques renovables i no contaminants que intentin preservar el medi ambient degut a la, cada vegada més, delicada situació en que es troba el planeta. La piezoelectricitat és un fenomen que transforma l'energia mecànica en energia elèctrica i compleix les característiques esmentades anteriorment. Amb un bon ús d'aquest tipus de materials, seria possible abastir d'electricitat algunes zones sense l'ús de la xarxa elèctrica principal.

Aquest estudi ajudarà a entendre i optimitzar el funcionament d'elements piezoelèctrics per futures aplicacions en les quals hi hagi com objectiu aprofitar l'energia mecànica produïda, per exemple, per un cotxe o una persona al caminar i transformar-la en energia elèctrica.

4 Especificacions bàsiques

- Dos transductors piezoelèctrics del tipus PI-876.A12.
- Platina d'alumini de 50 cm de llargada, 4 cm d'ample i 2 mm de gruix.
- Platina de poliestirè de 50 cm de llargada, 4 cm d'ample i 2 mm de gruix.
- Sistema de vibració a les platines, en aquest cas, excèntrica.
- Sistema d'adquisició de dades de voltatge.
- Resistències elèctriques
- Cables elèctrics
- Estany
- Soldador
- Sistema de perforació amb broques de diàmetre petit
- Serra
- Regleta de connexions

5 Estat de l'art

5.1 La piezoelectricitat

La piezoelectricitat és un fenomen que presenten determinats materials que al ser sotmesos a tensions mecàniques, adquireixen càrrega elèctrica.

Breu història

Aquest fenomen el van demostrar els germans Pierre Curie i Jacques Curie a l'any 1880. Van identificar que aquests tipus de materials són cristalls que no posseeixen centre de simetria i, per tant, a l'aplicar pressió (força mecànica) es dissocien els centres de gravetat de les càrregues positives i negatives i apareix diferència de potencial a la superfície.

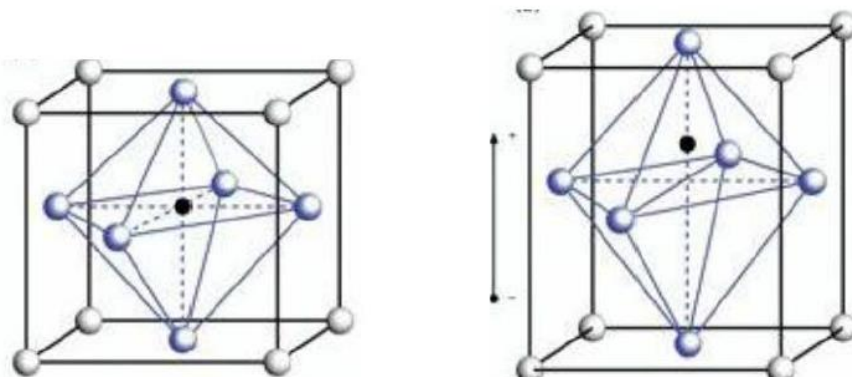


Figura 1 Desplaçament del c.d.g. i polarització del piezoelèctric, creant una diferència de potencial. Fuente IIT Ciudad Juárez.

Un any més tard, Gabriel Lippmann va deduir matemàticament l'efecte piezoelèctric invers que establia que aquests mateixos materials, al estar sotmesos a un camp elèctric, generaven una deformació mecànica.

Al 1914 es va començar a utilitzar els materials piezoelèctrics per diverses aplicacions, però no va ser fins al 1939 que aquests van patir una gran expansió al mercat degut al descobriment de materials amb propietats piezoelèctriques cent vegades més elevades i de fàcil sintonització.

Classificació

Els materials piezoelèctrics se solen classificar de la següent manera:

- Piezoelèctrics que presenten el fenomen de manera natural. Aquests, presenten un efecte piezoelèctric molt baix i, per aquesta raó, no s'han desenvolupat a nivell industrial.
- Piezoelèctrics que necessiten ser polaritzats. Coneguts com materials ceràmics piezoelèctrics. Presenten un notable efecte piezoelèctric i, per aquesta raó, el seu desenvolupament industrial ha estat alt.

Per entendre el procés de polarització, primer cal fer una breu explicació sobre els dominis de Weiss: Els àtoms de dins de cada domini de Weiss tenen la mateixa orientació del moment dipolar però diferent de la resta de dominis (a l'atzar) . Això fa que el material no tingui bones propietats magnètiques.

El procés de polarització consisteix a donar la mateixa orientació als tots els dipols que formen els dominis de Weiss. A l'aplicar un camp elèctric una vegada el material es sotmès a una temperatura superior a la de Curie es pot modificar l'orientació de la polaritat dels dominis de Weiss. El camp elèctric ha de romandre fins que la temperatura del piezoelèctric sigui la de la temperatura ambient.

La següent figura representa aquesta explicació. Al principi s'observa com el moment magnètic individual dels àtoms tenen la mateixa orientació dins dels seus respectius dominis de Weiss. Una vegada s'ha superat la temperatura de Curie i es comença a aplicar el camp elèctric, les parets de Bloch van desapareixen i els dominis s'unifiquen. En el resultat final s'observa que el moment magnètic de tots els àtoms tenen la mateixa orientació i això succeeix quan el material ja s'ha refredat.

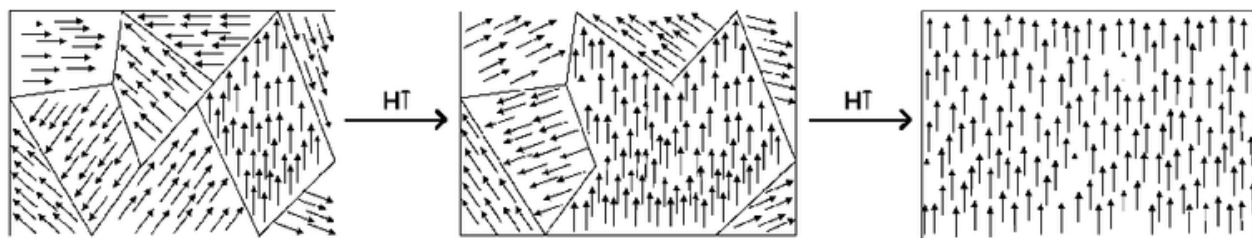


Figura 2. Procés de polarització. Font: wikipedia

Piezoelèctric model PI-876.A12

Aquest tipus de piezoelèctric és amb el qual es realitzarà l'estudi.

Els transductors piezoelèctrics de tipus PI-876 tenen tots les mateixes longituds, excepte el gruix. Per cas d'estudi, és de 0,5 mm.

A la següent figura es mostren les longituds:

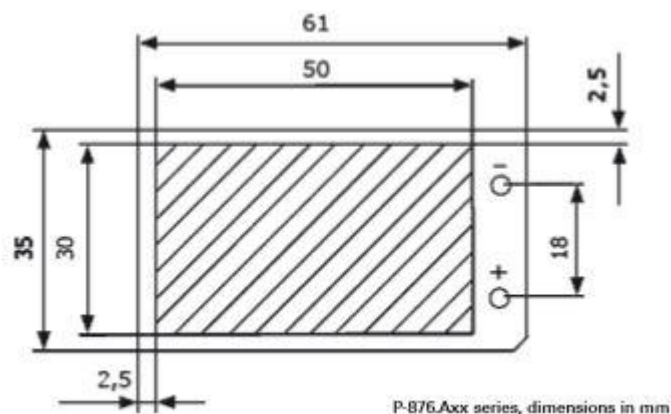


Figura 3. Dimensions de PI-876. Font: piceramic

És evident que, per generar valors de voltatge coherents, les oscil·lacions hauran de començar pel costat de l'esquerra de la Figura 3. Dimensions de PI-876. Font: piceramic, ja que les oscil·lacions hauran de ser perpendicular a la mida longitudinal del piezoelèctric.

Aquests tipus de transductors tenen una resistència interna de valor desconegut.

La següent figura (Figura 4. Taula amb les diferents característiques dels models P-876. Font: piceramic) mostra les característiques de cadascun dels models.



Technical Data

Model	P-876.A11	P-876.A12	P-876.A15	P-876.SP1	Tolerances
Operating voltage	-50 to +200 V	-100 to +400 V	-250 to +1000 V	-100 to +400 V	
Motion and positioning					
Lateral contraction, open-loop	400 $\mu\text{m/m}$ 1.6 $\mu\text{m/m/V}$	650 $\mu\text{m/m}$ 1.3 $\mu\text{m/m/V}$	800 $\mu\text{m/m}$ 0.64 $\mu\text{m/m/V}$	650 $\mu\text{m/m}$ 1.3 $\mu\text{m/m/V}$	min. (+20 %/-0) min. (+20 %/-0)
Mechanical properties					
Blocking force	90 N	265 N	775 N	280 N	
Length	61 mm	61 mm	61 mm	16 mm	± 0.5 mm
Width	35 mm	35 mm	35 mm	13 mm	± 0.5 mm
Thickness	0.4 mm	0.5 mm	0.8 mm	0.5 mm	± 0.5 mm
Bending radius	12 mm	20 mm	70 mm	—	max.
Drive properties					
Ceramic type	PIC 252 Layer thickness: 100 μm	PIC 255 Layer thickness: 200 μm	PIC 255 Layer thickness: 500 μm	PIC 255 Layer thickness: 200 μm	
Electrical Capacitance	150 nF	90 nF	45 nF	8 nF	$\pm 20\%$
Miscellaneous					
Operating temperature range*	-20 to +150 °C	-20 to +150 °C	-20 to +150 °C	-20 to +150 °C	
Mass	2.1 g	3.5 g	7.2 g	0.3 g	$\pm 10\%$
Voltage connection	Soldering pads	Soldering pads	Soldering pads	Soldering pads	
Recommended controller / amplifier (actuator mode)	E-413.D2 (s. p. 2-120) E-835 (s. p. 2-166)	E-413.D2 (s. p. 2-120) E-835 (s. p. 2-166)	E-508 (s. p. 2-150) E-835 (s. p. 2-166)	E-413.D2 (s. p. 2-120) E-835 (s. p. 2-166)	

* Short-term operation up to 180 °C

Figura 4. Taula amb les diferents característiques dels models P-876. Font: piceramic

Es pot observar que el transductor piezoelèctric que s'utilitzarà per l'estudi pot generar un voltatge màxim de 400 Volts.

També s'ha trobat que el rang de valors de les resistències de càrrega que es poden connectar amb el piezoelèctric és de [100 k Ω ; 2 M Ω] i que el piezoelèctric no es pot deformar més de 5 mm (diferència d'alçada entre extrems).



6 Campanya experimental

6.1 Preparatori

Per tal de realitzar les proves experimentals i determinar per quines condicions el transductor piezoelèctric donarà una major resposta elèctrica, s'estudiaran diferents materials, sobre els quals aquest s'enganxarà. Com es disposa d'un màxim de dos piezoelèctrics, només podran examinar-se dos materials, ja que una vegada el piezoelèctric s'enganxi a la platina no es podrà reutilitzar per cap altre ús. Per tant, s'ha decidit que s'estudiarà un material bastant rígid i un material bastant flexible per tal de cobrir un rang ample. Aquests seran l'alumini i el poliestirè respectivament.

És evident que per a que es puguin comparar els resultats de la resposta elèctrica dels transductors piezoelèctrics enganxats als diferents materials, hauran de tenir aproximadament les mateixes dimensions. Com que el piezoelèctric del tipus PI-876.A12 té una amplària de 35 mm, les platines hauran de tenir una amplada igual o una mica més gran per assegurar el bon contacte (enganxat) amb el piezoelèctric.

- Pel que fa a la llargada de les platines, es creu adequat començar les proves experimentals amb 50 cm. Una vegada s'ha decidit la longitud inicial de les provetes, s'ha concretat que els assaigs es realitzaran amb tres diferents longituds per cada platina per poder realitzar un estudi bastant ample. Les llargades escollides es poden observar a l'apartat: *Característiques de les platines i circuit elèctric utilitzat*.
- Pel que fa a l'amplària, es creu adequat 40 mm per, tal com s'ha esmentat anteriorment, assegurar el bon contacte entre piezoelèctric i platina.
- Pel que fa al gruix, s'estima que 2 mm és una bona mesura per a que ambdues platines tinguin un bon moviment a l'hora de sotmetre-les a diferents vibracions.

Al realitzar un ràpid estudi de mercat, s'han trobat platines d'alumini d'un metre de llargada, dos mm de gruix i amplada variable (20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm...). Mentre que de poliestirè s'ha trobat una secció de 50 cm de llargada, 2 mm de gruix i 25 cm d'amplada. Així que ambdós materials s'hauran de tallar per obtenir les platines desitjades.

Les proves experimentals consistiran en fer vibrar les platines de dues maneres:

- ❖ Un mode serà manual, i consistirà en aplicar força perpendicular en un extrem de la platina mentre l'altre extrem, on està l'element piezoelèctric, està ben subjectat i sense poder-se moure, de tal manera que a partir de la part on comenci el piezoelèctric estigui lliure.
- ❖ L'altra manera serà mitjançant l'ús d'una excèntrica. L'extrem de la platina contrari a on estigui el piezoelèctric es cargolarà amb la peça (veure Figura 5. *Peça 'C' i parts excèntrica*) que connecta la platina i el disc de l'excèntrica (**peça 'C'**) i aquest girarà a una determinada freqüència. L'altre extrem de la platina es fixarà de tal manera que a partir de la part on comenci el piezoelèctric estigui lliure. Per tant, s'ha de tenir en compte que, a l'hora de fixar aquest extrem és necessari que la platina quedi totalment plana i horitzontal quan l'eix excèntric estigui a la mateixa alçada que el centre del disc.

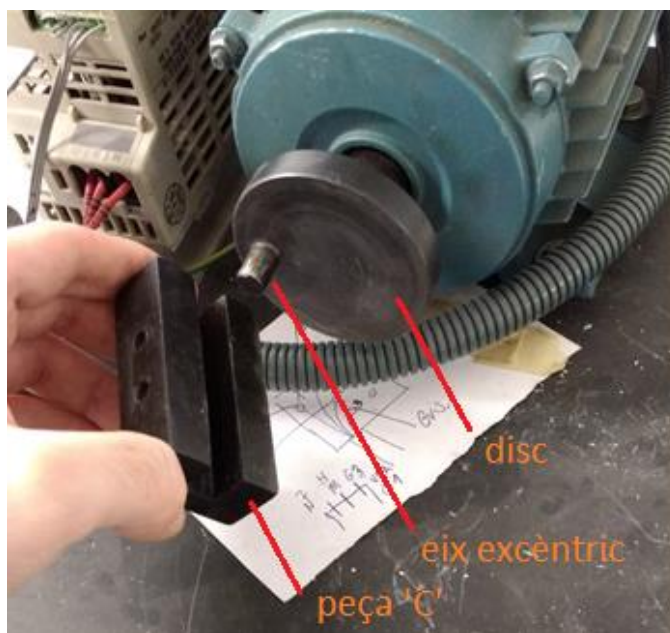


Figura 5. Peça 'C' i parts excèntrica

Les mesures verticals de l'excèntrica són: 22 mm de base, 63 mm de la superfície de la base fins al centre del disc de l'excèntrica.

Les mesures del disc de l'excèntrica es poden observar a la Figura 6. *Dimensions [mm] disc excèntrica.*

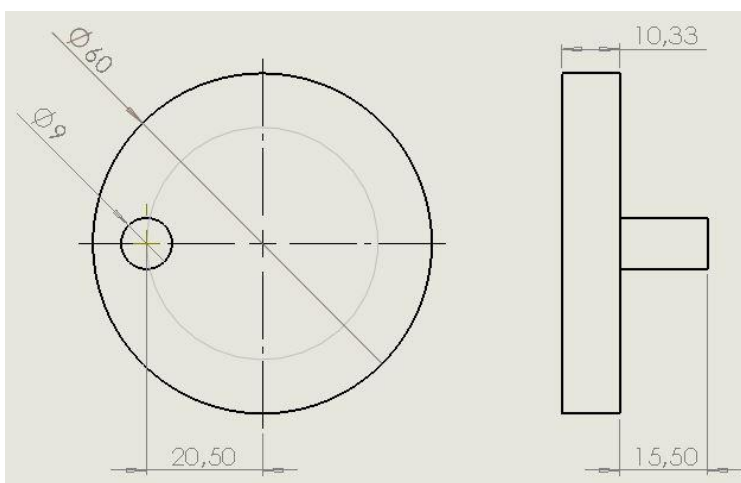


Figura 6. Dimensions [mm] disc excèntrica

Es pot observar que l'amplitud de les vibracions que generarà el disc de l'excèntrica a l'extrem de les platines d'estudi seran de 20,5 mm.

Degut a l'ús de l'excèntrica, com s'ha dit anteriorment, s'hauran de fer dos forats a ambdues platines per poder cargolar-les amb la peça 'C' ja que aquesta en té dos de 6 mm de diàmetre (veure Figura 7. *Dimensions peça 'C'*).

S'ha cregut convenient que els forats de les platines fossin de 7 mm per evitar complicacions a l'hora de cargolar-les amb la peça, per tant, aquest serà el diàmetre de la broca que s'utilitzarà.

També, s'ha de considerar la distància longitudinal que hi ha del centre dels forats fins al final de la peça, que com es pot observar a la Figura 7. *Dimensions peça 'C'* són 9,75 mm.

S'ha decidit que els forats de les platines tindran un marge d'un mm, respecte a l'anterior mesura, per tal de que la proveta no pugui xocar o fregar amb el disc de l'excèntrica una vegada comencin els assaigs, el que significa que la distància longitudinal entre el centre dels forats i el final de les platines serà de 8,75 mm aproximadament.

Determinar les mesures transversals és senzill. Observant la Figura 7. *Dimensions peça 'C'*, és clar que la distància entre el centre dels forats de les platines haurà de ser de 16 mm. La longitud dels centres dels forats fins al costat més pròxim haurà de ser de 12 mm per obtenir la centralitat.

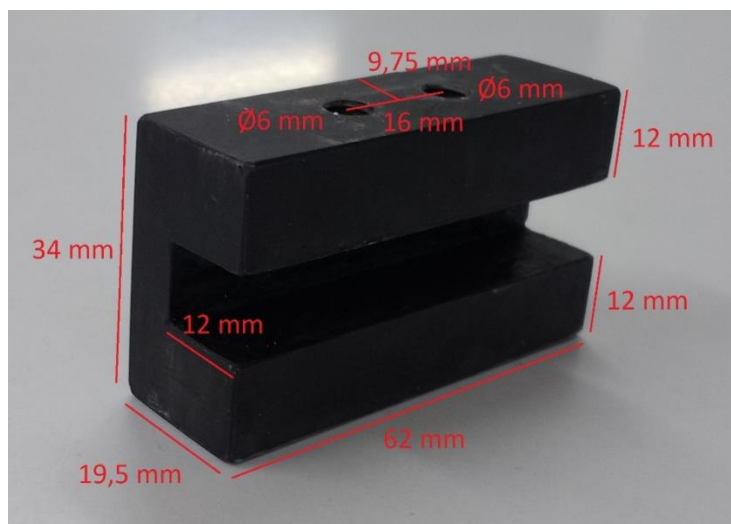


Figura 7. Dimensions peça 'C'

Per perforar s'utilitzarà un trepant d'engranatges de columna que està situat al Laboratori de Resistència de Materials del TR45 de l'ETSEIAAT. Per poder utilitzar el trepant, primer de tot, s'haurà d'immobilitzar la platina. Per això, s'utilitzarà un cargol de banc (veure Figura 8. *Cargol de banc amb platina de poliestirè*).



Figura 8. Cargol de banc amb platina de poliestirè

S'ha de tenir present que, a l'hora de perforar, es generaran i es despendran ferritges, per tant, per mesures de seguretat, serà necessari l'ús de guants i ulleres de protecció. També s'haurà de subjectar bé el cargol de banc per tal de que no es mogui una vegada es comenci a perforar la platina (veure Figura 9. *Perforació de platina. Mesures de seguretat i passos a seguir*).



Figura 9. Perforació de platina. Mesures de seguretat i passos a seguir

És evident que una vegada realitzats els assaigs per la primera longitud de les platines, encara quedarà realitzar les proves per dos longituds més. Per tant, les provetes s'hauran de tallar amb una serra dues vegades i, conseqüentment, s'hauran de tornar a fer els forats a ambdues platines per cada una d'elles. Una vegada realitzat aquest procés, les "noves" platines ja estaran disponibles per reprendre els assaigs.

Una vegada realitzats els forats a la platina corresponent a la primera longitud, es pensarà a on i com enganxar el transductor piezoelèctric.

S'ha decidit que el piezoelèctric es col·loqui, aproximadament, centrat i a una distància de l'extrem de la platina aproximada a l'amplada d'aquesta, és a dir, 40 mm. Per enganxar-lo, s'ha decidit que s'utilitzarà Loctite, però abans d'això, serà necessari allisar i netejar la zona on el piezoelèctric s'enganxarà. Per allisar s'utilitzarà paper de vidre i per netejar alcohol.

Degut a que el poliestirè no suporta temperatures molt elevades, s'ha decidit, per precaució, soldar abans al piezoelèctric, que s'enganxarà a aquesta platina, els cables als seus borns. Primer de tot, s'ha

netejat els borns del piezoelèctric amb un bisturí (rascant) per tal de treure les impureses que hi puguin haver i assegurar una bona connexió amb els cables. Després, a l'hora de soldar, s'ha anat amb molta cura ja que els borns del transductor piezoelèctric no suporten temperatures molt elevades i, per precaució, s'ha considerat que el soldador no podia estar en contacte amb els borns més de dos segons. És evident, que aquestes mateixes mesures es tindran en compte amb el transductor piezoelèctric de la platina d'alumini.

Ara, es disposarà a enganxar els piezoelèctrics a la seves respectives platines. Per fer-ho, es marcarà amb llapis, a les platines, la zona on aniran. Llavors es col·locarà un paper antiadherent entre la taula i les platines per a que, en cas que el pegament sobresurti pels costats de les provetes, no es quedin enganxades a la taula. Seguidament, s'aplicarà una capa de pegament sobre la zona especificada i es col·locarà el piezoelèctric. Ràpidament es posarà a sobre d'aquest un altre paper antiadherent per tal de poder aplicar força al piezoelèctric pel correcte enganxat.

Una vegada realitzat el procés, es va creure oportú, durant les 24 hores que triga el Loctite en assegurar un bon enganxat, posar unes gomes a sobre dels papers antiadherents superiors, les quals, a sobre, tenien un pes (veure Figura 10. *Metodologia pel correcte enganxat del transductor piezoelèctric*).



Figura 10. Metodologia pel correcte enganxat del transductor piezoelèctric

Una vegada transcorri aquest temps, es soldaran els cables al piezoelèctric de l'alumini de la mateixa forma que s'ha explicat pel piezoelèctric de la platina de poliestirè. En aquest cas, s'ha decidit immobilitzar la platina i la part final del cable amb cinta adhesiva per tal de que hi hagués el mínim moviment (veure Figura 11. *Metodologia per soldar els cables als borns del transductor piezoelèctric de la platina d'alumini*).

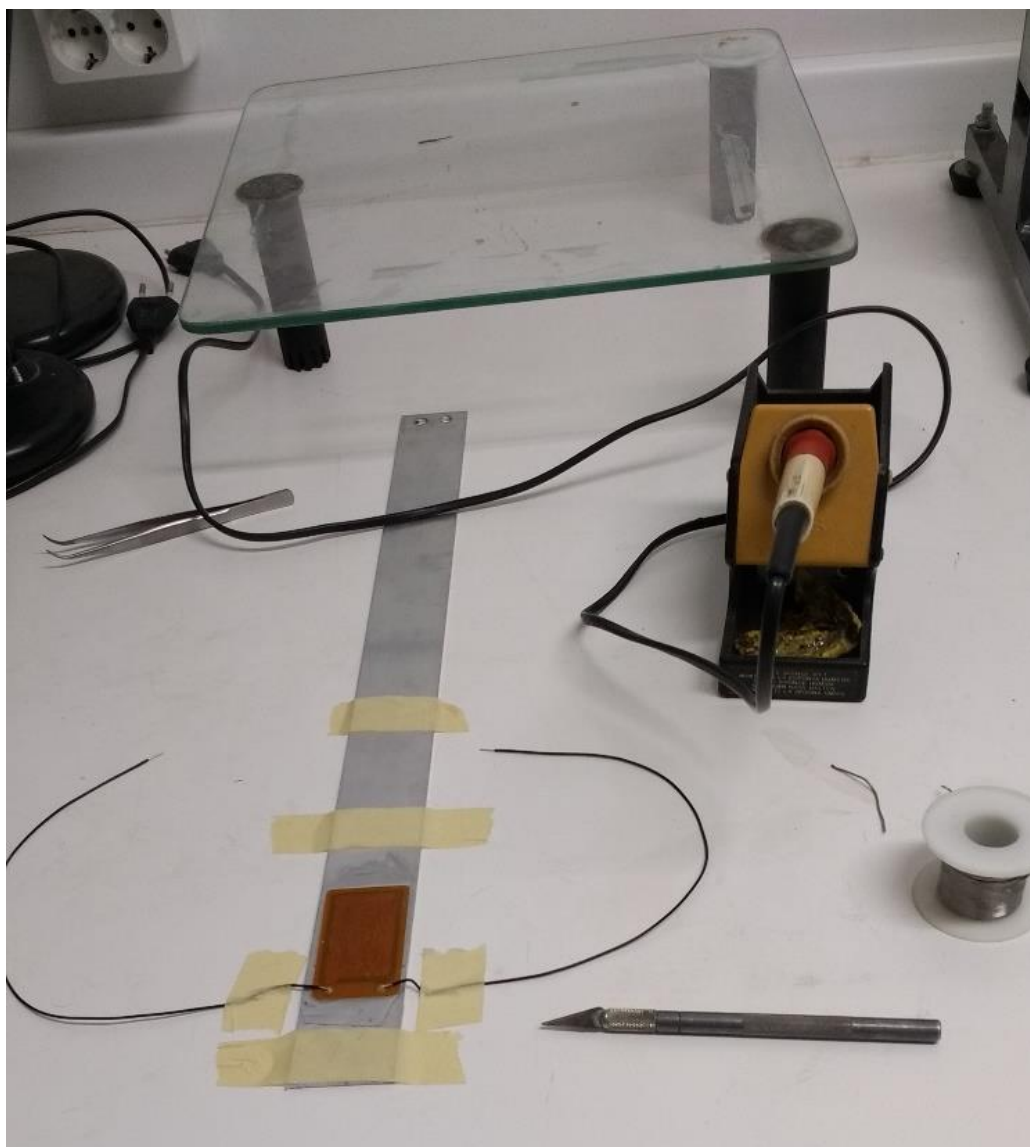


Figura 11. Metodologia per soldar els cables als borns del transductor piezoelèctric de la platina d'alumini



Per realitzar les proves experimentals, és evident que, els cables soldats als borns dels transductors piezoelèctrics han de formar un circuit tancat, és a dir, hauran d'haver connexions entre aquests i resistències externes i, per tant, serà necessari l'ús d'una regleta de connexions.

S'ha decidit recobrir d'estany tots els cables que s'utilitzin per fer el circuit elèctric, és a dir, els cables dels piezoelèctrics (platines d'alumini i poliestirè) i els cables que mesuren la diferència de potencial mitjançant l'instrument d'adquisició de dades, per tal d'agilitzar el procés de connexions i assegurar un bon contacte.

Se sap que el transductor piezoelèctric té incorporada una resistència que se suposa molt elevada però de valor desconegut i que el sistema d'adquisició de dades no pot identificar lectures superiors als 10 volts. Per tant, s'haurà de "jugar" amb aquests dos aspectes.

1. S'haurà d'aconseguir que la lectura de la tensió elèctrica sigui el suficientment elevada per considerar-la com a vàlida, ja que el sistema d'adquisició té una precisió de 0,4 mV, i això s'aconsegueix connectant una elevada resistència de càrrega ja que aquesta estarà col·locada en sèrie amb la resistència interna del piezoelèctric.

A mesura que el valor de la resistència de càrrega s'aproximi al valor de la resistència interna del piezoelèctric, el consum de voltatge també s'igualarà, és a dir, la caiguda de tensió de la resistència interna del transductor piezoelèctric disminuirà i la de la resistència de càrrega augmentarà.

2. La resistència de càrrega haurà de ser el suficientment petita per a que el sistema d'adquisició de dades no superi lectures superior als 10 volts, que és la mesura que té com a límit.

Per a que les coses siguin més senzilles, s'ha decidit que la resistència de càrrega estigui formada per dues resistències R_1 i R_2 , de tal manera que el sistema d'adquisició de dades, només llegirà la caiguda de tensió degut a l'efecte de R_2 . Una vegada es tinguin els resultats de la diferència de potencial a R_2 serà senzill trobar la de la resistència de càrrega mitjançant la llei d'Ohm $V = R \cdot I$ ja que se sap que $V_2 = R_2 \cdot I$ perquè la intensitat és constant al llarg del circuit (veure Equació 1).

$$V_{\text{càrrega}} = (R_1 + R_2) \cdot I = (R_1 + R_2) \cdot \frac{V_2}{R_2} = V_2 \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

Equació 1



Una vegada se sàpiga el voltatge que consumeix cada part del circuit, la potència es pot calcular mitjançant l'Equació 2. Per tant, en el cas de R_2 , la potència consumida estarà descrita per l'Equació 3 i en el cas de $R_{càrrega}$ per l'Equació 4.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \text{Equació 2}$$

$$P_2 = \frac{V_2^2}{R_2} \quad \text{Equació 3}$$

$$P_{càrrega} = \frac{V_{càrrega}^2}{R_1 + R_2} \quad \text{Equació 4}$$

Cal recordar que per a que aquest tipus de transductor piezoelèctric generi valors de tensió que es corresponguin amb la realitat, cal que la resistència consum estigui entre un rang de valors de 100 k Ω i 2 M Ω . També, que la tensió màxima que pot generar el transductor piezoelèctric és de 400 Volts. Per tant, aquestes dues dades s'hauran de tenir en compte de cara als assaigs.

Tal com s'ha dit en l'Objecte del treball, les proves experimentals consistiran en determinar per quines condicions, en ambdues platines, el transductor piezoelèctric generarà una major potència elèctrica. Els termes a tenir en compte són:

- Rigidesa del material de la platina sobre la qual s'enganxarà el transductor piezoelèctric.
- Mètode per generar vibracions: Mètode de l'extrem lliure o mètode de l'excèntrica.
- Longitud del voladís de la platina.
- Resistència de la càrrega.
- Amplitud o freqüència de les vibracions.

6.2 Muntatge

Durant els assaigs s'utilitzaran dues metodologies experimentals:

- Mètode de l'extrem lliure: Consisteix en aplicar força (o diferència d'alçada inicial) a l'extrem contrari de la platina on estigui situat el piezoelèctric generant una amplitud inicial màxima donada i, per tant, la platina oscil·larà fins arribar a la seva posició d'equilibri veure Figura 12. *Mètode de l'extrem lliure*).



Figura 12. Mètode de l'extrem lliure

- Mètode de l'excèntrica: Consisteix en fer ús d'una excèntrica (amplitud constant) la qual farà oscil·lar l'extrem de la platina a una freqüència determinada (veure Figura 13. *Mètode de l'excèntrica*).

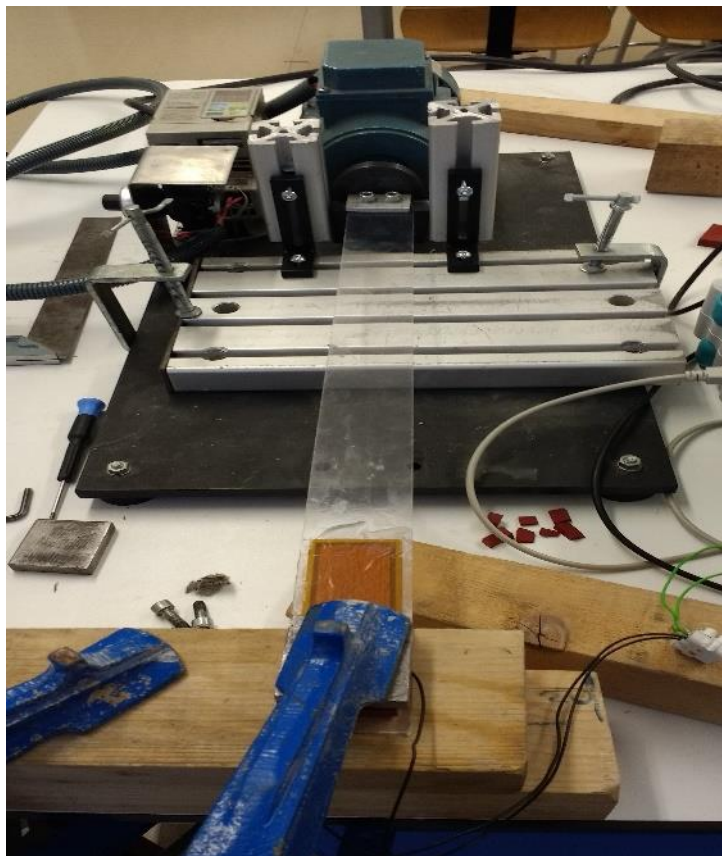


Figura 13. Mètode de l'excèntrica

Per poder realitzar els assaigs, primer de tot, cal començar a realitzar el muntatge. El primer pas, serà escollir una base amb certa alçada per tal de que a sobre hi sigui l'extrem de la platina on estigui el piezoelèctric. S'ha decidit optar per taulons de fusta.

Per agilitzar els assaigs, s'ha decidit utilitzar per totes les probes els mateixos taulons de fusta, per tant, encara que l'alçada total dels taulons és indiferent pel mètode de l'extrem lliure, no ho és pel mètode de l'excèntrica ja que l'alçada total hauria de ser de 102 mm. Aquest número ve de sumar totes les alçades necessàries: 22 mm de la base de l'excèntrica, 63 mm de la base al centre del disc de l'excèntrica i 17 mm és la meitat de l'alçada total que de la peça 'C'.

Una vegada escollits els taulons de fusta, s'hauran de subjectar a la taula mitjançant un sergent el qual impedirà qualsevol tipus de moviment. Tot seguit, es posarà damunt dels taulons, l'extrem de la platina on estigui el transductor piezoelèctric i es col·locarà de tal forma que la primera marca d'aquest (veure

Figura 14. *Primera marca del transductor piezoelèctric*) sigui el principi del voladís i que la platina sigui perpendicular al tauló de fusta superior.

Tot seguit, serà el moment d'immobilitzar l'extrem de la platina amb un altre sergent. Per això, es col·locaran unes gomes per sobre de l'extrem de la platina. S'ha de pensar que una vegada col·locat el sergent, aquestes gomes hauran de cobrir el piezoelèctric fins la primera marca, per tant, a l'inici, s'ha de deixar una certa distància entre les gomes i la marca ja que una vegada el sergent faci força, les gomes s'expandiran. El següent pas, serà posar per sobre d'aquestes una peça plana per tal de que reparteixi uniformement la força mecànica que farà el sergent i seguidament, col·locar-lo (veure Figura 15. *Muntatge sobre com col·locar el sergent sobre les platines*).

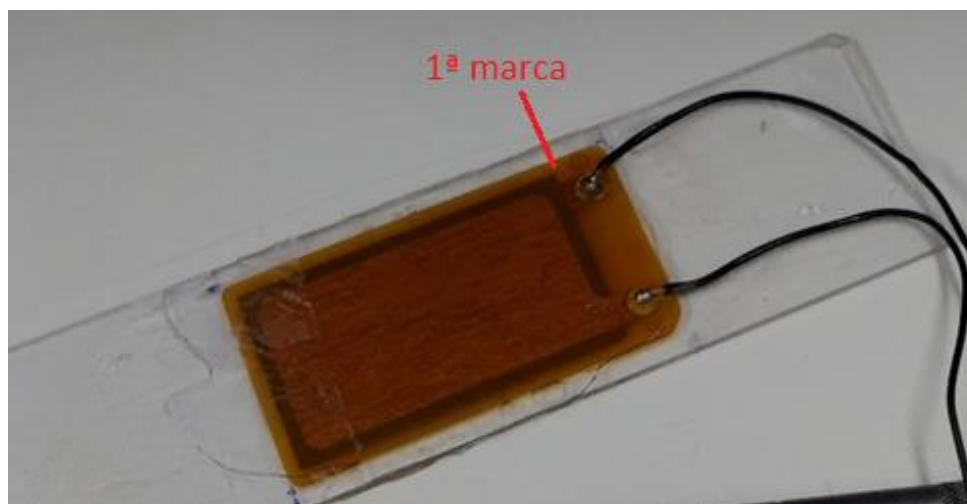


Figura 14. Primera marca del transductor piezoelèctric

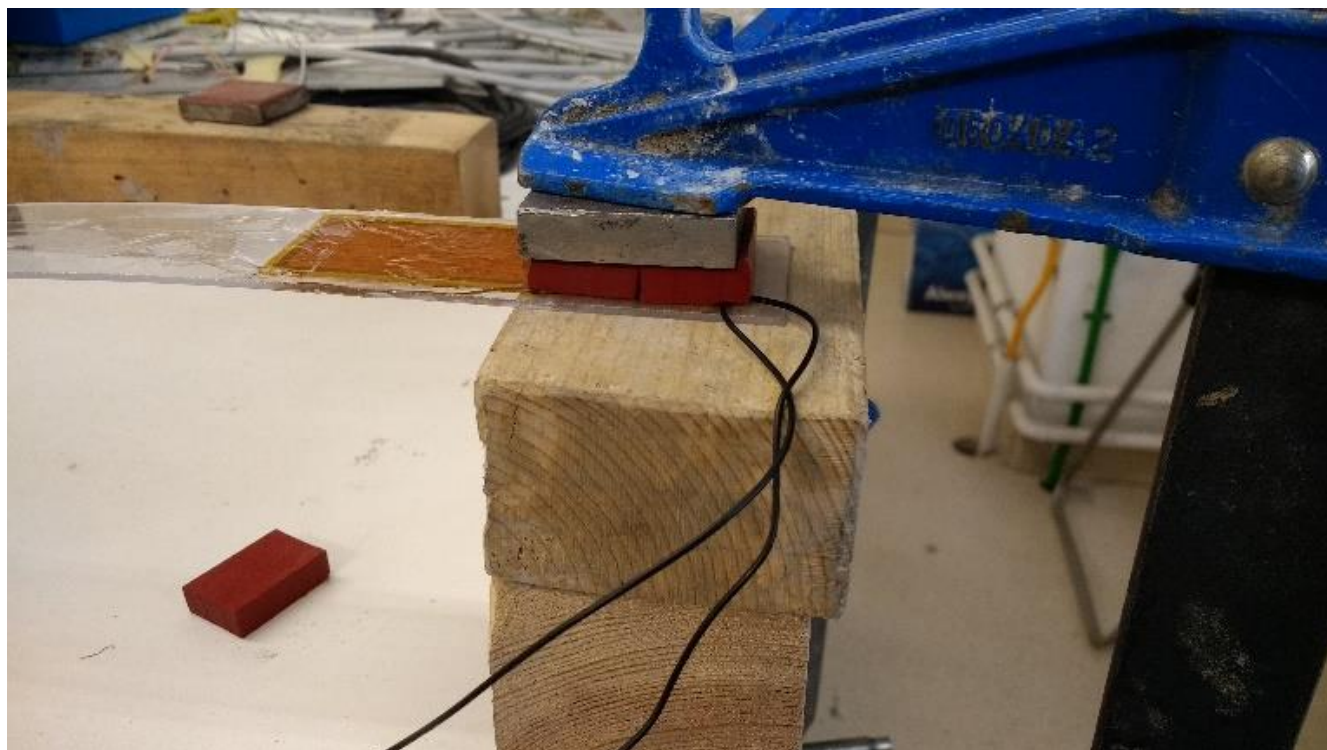


Figura 15. Muntatge sobre com col·locar el sergent sobre les platines

En el mètode de l'extrem lliure, s'ha procedit mesurant les alçades inicials a l'extrem lliure amb l'ajuda d'un escaire i després s'han aplicat diferències d'alçades, és a dir, s'ha aplicat força perpendicular (cap avall) a l'extrem fins que arriba a una diferència d'alçada determinada respecte la posició en repòs. A partir d'aquí, es posa en funcionament el sistema d'adquisició de dades i es deixa anar l'extrem de la platina (veure Figura 16. *Metodologia en el mètode de l'extrem lliure*).

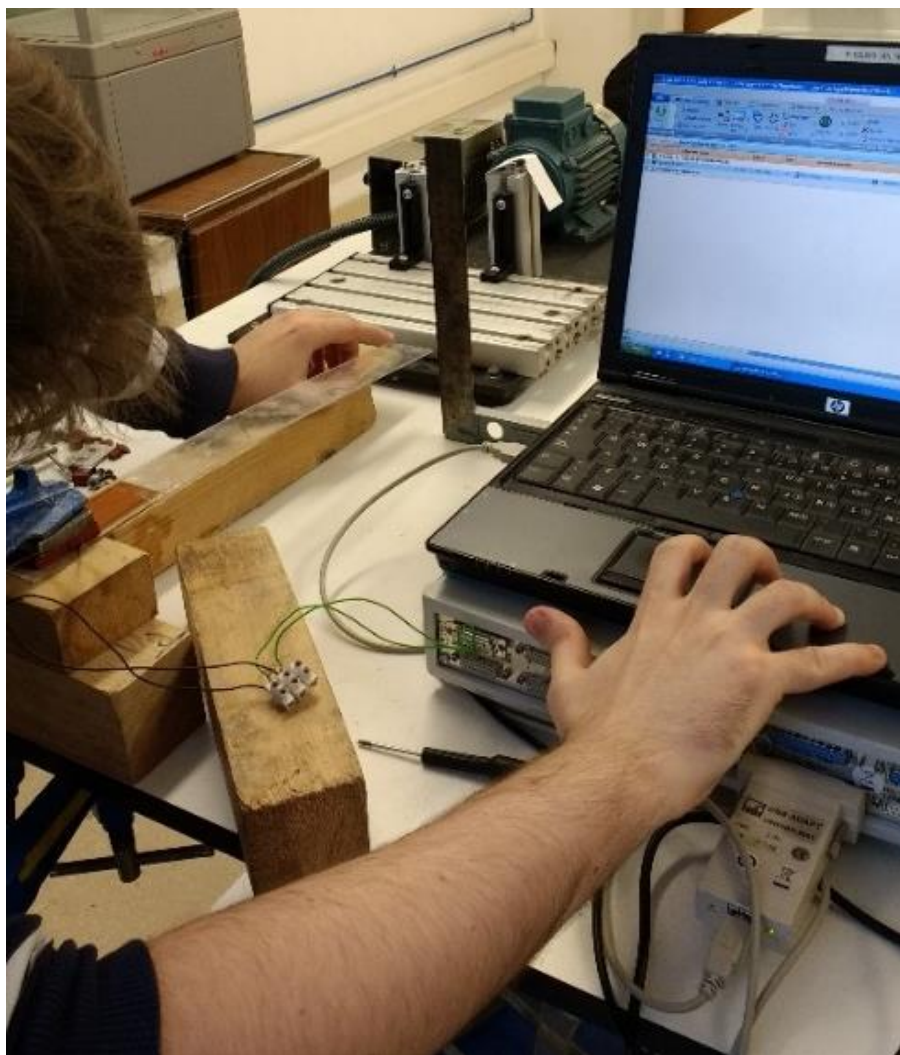


Figura 16. Metodologia en el mètode de l'extrem lliure

En el mètode de l'excèntrica, s'ha procedit cargolant la platina d'estudi amb la peça 'C'. Després, aquesta s'ha connectat amb el disc de l'excèntrica (veure Figura 17. *Platina cargolada amb la peça 'C' connectada a l'excèntrica*). S'ha de tenir en compte que l'excèntrica s'ha de col·locar de tal manera que la peça ha de quedar ben centrada al disc, que la superfície d'aquest ha de ser perpendicular a la superfície del cantó de la platina i que és necessari deixar un cert marge entre el disc i la peça 'C', ja que sinó hi ha el perill que en algun moment freguin o xoquin i pugui influir en els resultats, però tampoc pot ser tan gran com per que la peça 'C' pugui sortir de l'eix excèntric.

Una vegada realitzat el muntatge, es posa en funcionament el sistema d'adquisició de dades i l'excèntrica.

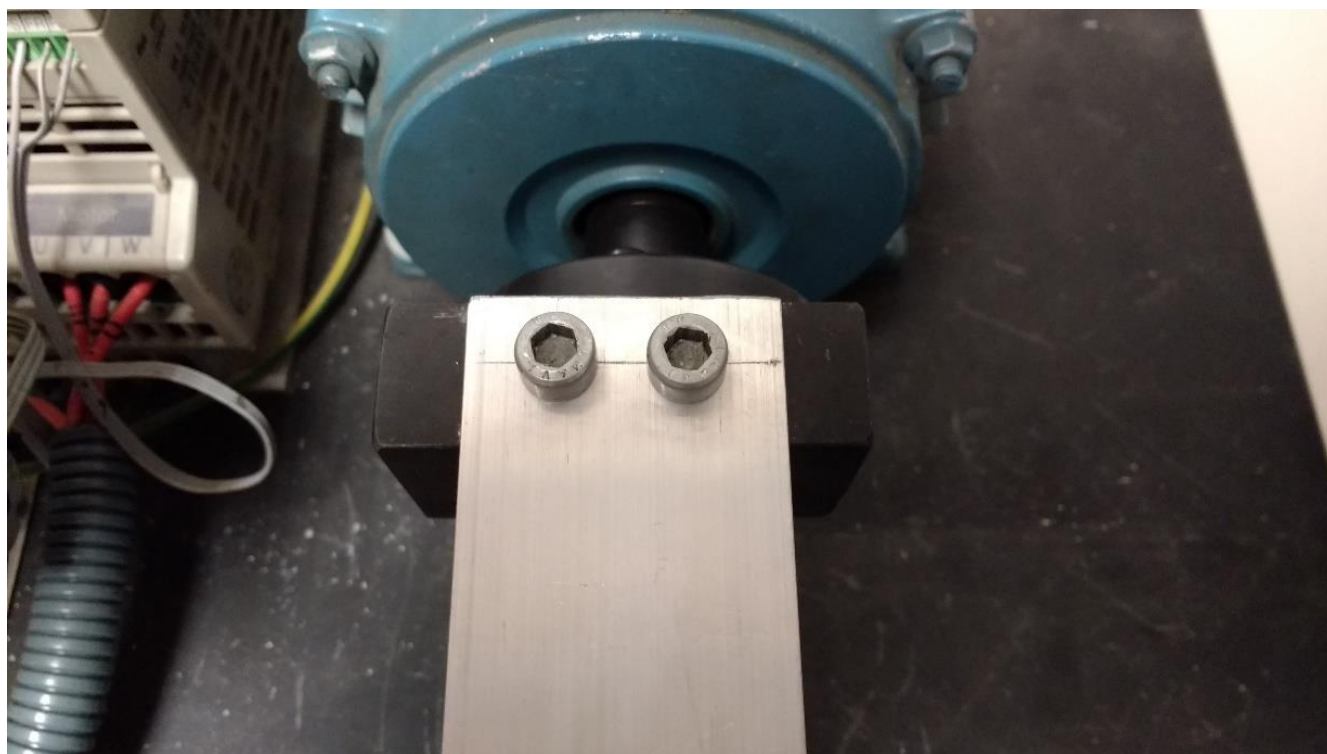


Figura 17. Platina carregada amb la peça 'C' connectada a l'excèntrica

Degut a les propietats físiques de la platina de poliestirè, a l'hora de realitzar els assaigs amb l'excèntrica, s'han hagut de prendre algunes mesures per a que aquesta no trenqués i poder realitzar assaigs vàlids.

Degut a la gran flexibilitat d'aquesta platina, les freqüències de l'excèntrica no podien ser gaire elevades ja que la proveta feia un petit moviment de compressió a la part central que s'accentuava a mesura que la freqüència augmentava. També, s'han hagut de posar unes guies d'alumini immobilitzades amb sergents que assegurassin que la peça 'C' realitzés un moviment estrictament vertical ja que degut a la flexibilitat i lleugeresa de la platina hi havia el perill de que es doblegués o fes un moviment incorrecte a l'hora de prendre les mesures de voltatge.

El muntatge es pot observar a la Figura 18. *Metodologia en el mètode de l'excèntrica per la platina de poliestirè.*

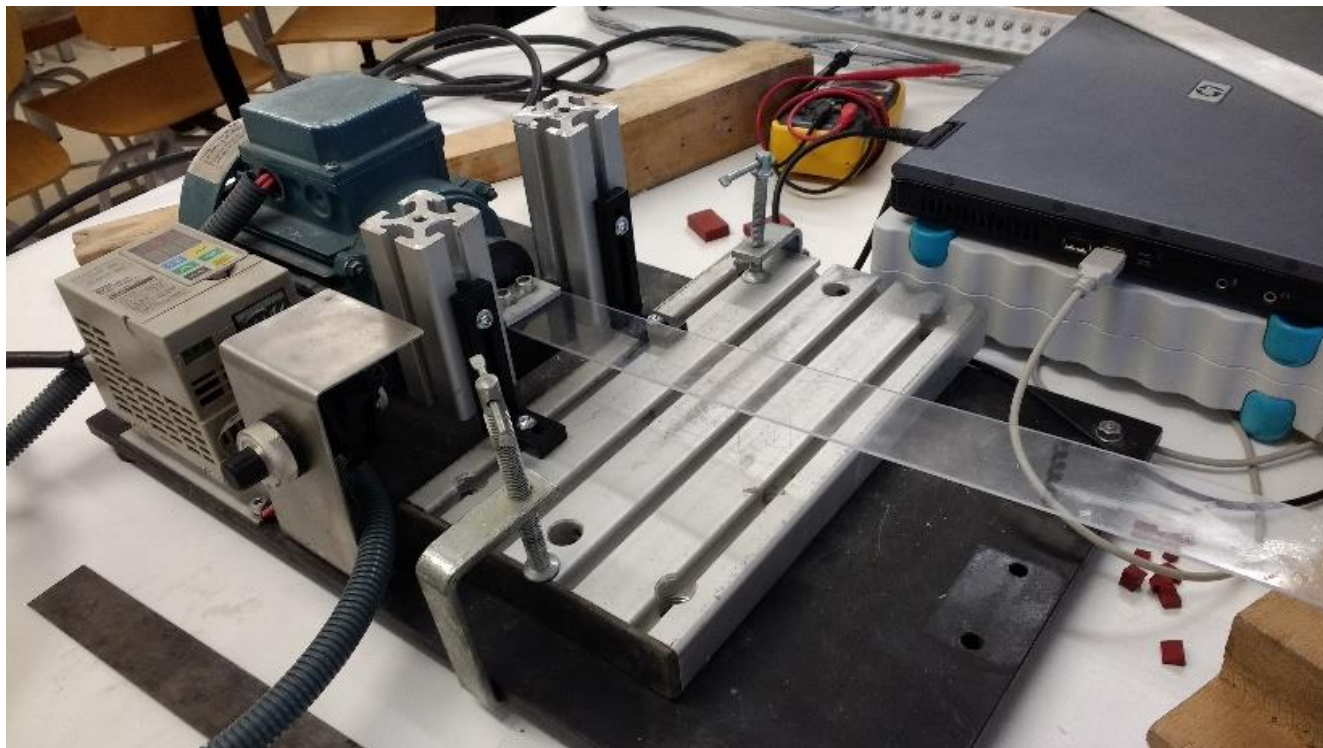


Figura 18. Metodologia en el mètode de l'excèntrica per la platina de poliestirè

Cal dir que, tot i que no es veu a la Figura 18. *Metodologia en el mètode de l'excèntrica per la platina de poliestirè*, es va recobrir les guies d'alumini amb paper ja que quan la peça arribava a la part superior del disc, feia un petit moviment horitzontal el qual provocava que la peça xoqués amb les guies. Amb aquesta correcció, el xoc s'esmorteïa i no influïa en els resultats.

6.3 Característiques de les platines i circuit elèctric utilitzat

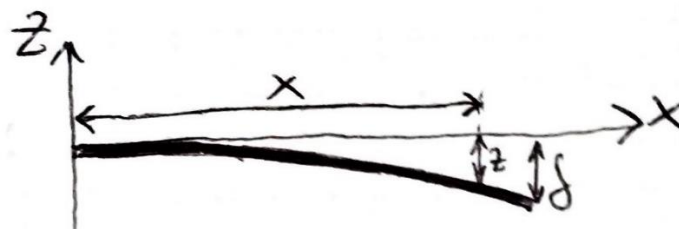
Una vegada finalitzades les proves experimentals amb la longitud inicial de les platines, caldrà tallar-les i començar una altra vegada amb els assaigs. Per decidir les mesures de les següents longituds, s'ha de tenir en compte, que el transductor piezoelèctric no es pot deformar més de 5 mm. Per fer-ho, s'intentarà trobar una expressió que trobi la fletxa per cada punt de les platina. Com s'observarà més endavant, per la platina de poliestirè (la més flexible), no es pot calcular. Una vegada no ha estat possible calcular el resultat teòric, es mira de solucionar el problema pràcticament, i això s'ha fet. Fent comprovacions pràctiques amb la platina de poliestirè s'ha observat que per a que el transductor es

deformés 5 mm s'havia de baixar moltíssim l'extrem de la proveta i s'ha determinat que això no suposaria cap inconvenient a l'hora de determinar les següents longituds.

S'ha decidit que les longituds d'estudi de ambdues provetes haurien de disminuir aproximadament 90 mm respecte l'anterior longitud per tal de cobrir un rang de llargades bastant ample, per tant, com s'estudiaran tres llargades diferents, les longituds totals seran 500 mm, 410 mm i 320 mm. Les dimensions de les platines utilitzades durant els assaigs (longitud, voladís, δ) es poden observar en la Taula 1. *Llargada de les platines*, essent la longitud de voladís, la distància entre la primera marca del piezoelèctric i el final de la platina. La longitud δ és la diferència d'alçada entre el principi i el final de la platina en estat de repòs pel mètode de l'extrem lliure (veure de manera més visual a la Il·lustració 1. *Representació mètode de l'extrem lliure en estat de repòs*).

	Long 1 [mm]	Vol 1 [mm]	$\delta 1$ [mm]	Long 2 [mm]	Vol 2 [mm]	$\delta 2$ [mm]	Long 3 [mm]	Vol 3 [mm]	$\delta 3$ [mm]
Alumini	500	451	0	410	361	0	320	271	0
Poliestirè	500	449	47	409	358	17	321	270	6

Taula 1. Llargada de les platines



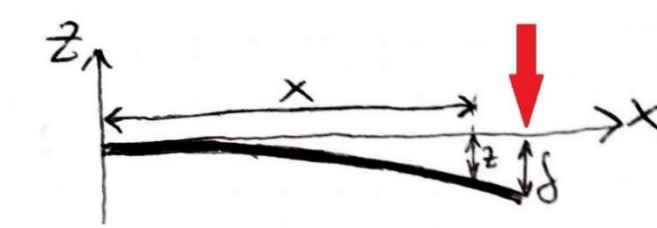
Il·lustració 1. Representació mètode de l'extrem lliure en estat de repòs

A la Taula 1. *Llargada de les platines*, es poden observar petites diferències entre les longituds totals i longituds de voladís de les diferents platines. Això es degut a dos motius:

1. A l'hora d'enganxar el transductor a la platina hi va haver una petita desviació deguda a que al col·locar el piezoelèctric damunt del pegament, es movia molt quan s'havia d'aplicar força per enganxar-lo. La idea inicial era que el voladís de la primera longitud (voladís 1) de ambdues platines fos de 450 mm.
2. A l'hora d'acurtar les platines, s'ha intentat que les dimensions tallades fossin sempre les mateixes per ambdues platines, però al fer-ho amb serra, era difícil ser exacte.

Tot i així, al resultar tan petites aquestes diferències, es creu que els resultats de l'alumini i del poliestirè es podran comparar per cada tipus de longitud sense cometre pràcticament error. Per tant, es menysprearan aquestes petites diferències.

La Il·lustració 2. Representació mètode de l'extrem lliure al aplicar una força P a l'extrem de la platina és similar a la Il·lustració 1. Representació mètode de l'extrem lliure en estat de repòs; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, però en aquesta desplaçament δ és originat a causa d'una força 'P' vertical generada a l'extrem de la platina.

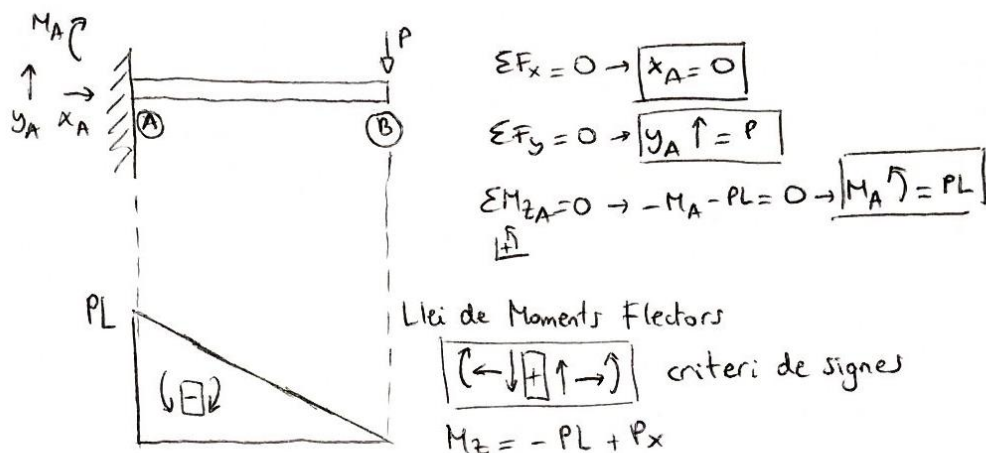


Il·lustració 2. Representació mètode de l'extrem lliure al aplicar una força P a l'extrem de la platina

Tot seguit, es disposarà a calcular una fórmula que permeti calcular la fletxa en qualsevol punt de la platina d'alumini sotmesa a una força 'P'.

La manera de calcular-la és diferent per cada platina ja que en la de l'alumini és pot considerar que la deformació deguda al seu propi pes es menyspreable. Això es pot observar en el desplaçament δ quan la platina està en repòs (veure Taula 1. *Llargada de les platines*).

Com es pot observar a la Il·lustració 3. Càlcul de la fletxa per la platina d'alumini, primer de tot, es calculen les reaccions en A (principi del voladís) mitjançant l'equilibri de forces. Aquestes són necessàries per poder calcular la llei de Moments Flectors. Més endavant, es fa ús del segon teorema de Mohr per obtenir l'expressió genèrica del desplaçament vertical en cada punt i l'expressió concreta del desplaçament al final de la platina.



Don Teorema de Mohr: $v_B = v_A + \theta_A(x_B - x_A) + \int_A^B \frac{M(x)}{E \cdot I_z} (x_B - x(x)) dx$

$$z = \int_0^x \frac{-PL + P_y}{E \cdot I_z} (x - y) dy = \int_0^x \frac{-PLx + PLy + P_yx - P_y^2}{E \cdot I_z} dy =$$

$$= \frac{P}{E \cdot I_z} \int_0^x (-Lx + Ly + yx - y^2) dy = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-Lxy + \frac{Ly^2}{2} + \frac{y^2x}{2} - \frac{y^3}{3} \right]_0^x =$$

$$= \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} x^2 + \frac{x^3}{6} \right]$$

 Quan $x=L \rightarrow z = f \rightarrow f = -\frac{PL^3}{3EI_z}$

Il·lustració 3. Càlcul de la fletxa per la platina d'alumini

Per poder calcular la fletxa en cada punt de la platina d'alumini (veure Equació 6), és necessari obtenir el valor de l'expressió $\frac{P}{E \cdot I_z}$ per cada longitud de la platina i desplaçament δ aplicat mitjançant l'Equació 5. En tots els casos, és evident que, el paràmetre 'L' és la longitud del voladís. El desplaçament vertical en qualsevol punt 'x' és la variable 'z', tal com es mostra a la Il·lustració 2. Representació mètode de l'extrem lliure al aplicar una força P a l'extrem de la platina.

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3}$$

Equació 5

$$z = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right]$$

Equació 6

▪ Longitud 1

Els desplaçaments δ realitzats durant els assaigs per la longitud 1 de la platina d'alumini han estat: 5 mm, 10 mm, 15 mm i 20 mm.

○ $\delta = 5$ mm

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 5 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{451^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -1,635 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2}$$

Equació 7

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -1,635 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{451}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right]$$

Equació 8

○ $\delta = 10$ mm

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 10 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{451^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -3,27 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2}$$

Equació 9

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -3,27 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{451}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right]$$

Equació 10

○ $\delta = 15$ mm

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 15 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{451^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -4,9 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2}$$

Equació 11

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -4,9 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{451}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right]$$

Equació 12

○ $\delta = 20$ mm

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 20 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{451^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -6,54 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad \text{Equació 13}$$

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -6,54 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{451}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \quad \text{Equació 14}$$

▪ Longitud 2

Els desplaçaments δ realitzats durant els assaigs per la longitud 2 de la platina d'alumini han estat: 5 mm, 10 mm i 15 mm.

○ $\delta = 5 \text{ mm}$

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 5 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{361^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -3,19 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad \text{Equació 15}$$

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -3,19 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{361}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \quad \text{Equació 16}$$

○ $\delta = 10 \text{ mm}$

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 10 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{361^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -6,38 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad \text{Equació 17}$$

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -6,38 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{361}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \quad \text{Equació 18}$$

○ $\delta = 15 \text{ mm}$

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 15 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{361^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -9,57 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad \text{Equació 19}$$

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -9,57 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{361}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \quad \text{Equació 20}$$

▪ Longitud 3

Els desplaçaments δ realitzats durant els assaigs per la longitud 3 de la platina d'alumini han estat els mateixos que per l'anterior longitud: 5 mm, 10 mm i 15 mm.

○ $\delta = 5 \text{ mm}$

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 5 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{271^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -7,54 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad \text{Equació 21}$$

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -7,54 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{271}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \quad \text{Equació 22}$$

○ $\delta = 10 \text{ mm}$

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 10 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{271^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -1,51 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-2} \quad \text{Equació 23}$$

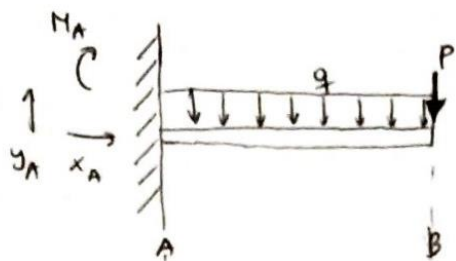
$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -1,51 \cdot 10^{-6} \left[-\frac{271}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \quad \text{Equació 24}$$

○ $\delta = 15 \text{ mm}$

$$v_B = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{L^3}{3} \rightarrow 15 = -\frac{P}{E \cdot I_z} \cdot \frac{271^3}{3} \rightarrow \frac{P}{E \cdot I_z} = -2,26 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-2} \quad \text{Equació 25}$$

$$z(x) = \frac{P}{E \cdot I_z} \left[-\frac{L}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \rightarrow z = -2,26 \cdot 10^{-6} \left[-\frac{271}{2} \cdot x^2 + \frac{x^3}{6} \right] \quad \text{Equació 26}$$

Per calcular la fletxa en qualsevol punt de la platina de poliestirè, el mètode utilitzat anteriorment no és vàlid ja que no es pot suposar que la deformació deguda al pes de la pròpia platina sigui menyspreable (mirar valors de δ a la Taula 1. *Llargada de les platines*). Per tant, a més de la força 'P' apareix una càrrega 'q' repartida uniformement pel voladís 'L' de la platina generada pel seu propi pes. Degut a aquesta nova força, com es pot observar en la Il·lustració 4. *Càlcul de la fletxa per la platina de poliestirè*, el conjunt 'P' i 'E', ambdós paràmetres són incògnita, no es pot aïllar com en el cas de la platina d'alumini, el que significa que l'expressió que dóna la fletxa en qualsevol punt no es pot calcular.



$$\sum F_x = 0 \rightarrow X_A = 0$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow Y_A = qL + P$$

$$\sum M_{z_A} = 0 \rightarrow M_A \uparrow = \frac{qL^2}{2} + PL$$

Llei de Moments Flectors

$\left[\leftarrow \downarrow \uparrow \rightarrow \uparrow \right]$ Criteri de signes

$$M_z = \left(-\frac{qL^2}{2} - PL \right) + \left(-q \times \frac{x}{2} \right) + (qLx + Px)$$

don Teorema de Mohr: $\theta_B = \theta_A + \int_A^B \frac{M(x)}{E \cdot I_z} (x_B - x(x)) dx$

$$z = \int_0^x \frac{-\frac{qL^2}{2} - PL - \frac{qx^2}{2} + qLy + Px}{2EI_z} (x-y) dy =$$

$$= \frac{1}{2EI_z} \int_0^x \left(-\frac{qL^2}{2}xy + \frac{qL^2}{2}y^2 - PLxy + PLy^2 - \frac{qx^3}{3} + \frac{qy^4}{4} + qLxy^2 - \frac{2}{3}qLy^3 + Pxy^2 - \frac{2}{3}Py^3 \right) dy$$

$$= \frac{1}{2EI_z} \left[-\frac{qL^2}{2}x^2y + \frac{qL^2}{2}y^2 - PLxy + PLy^2 - \frac{qx^3}{3}y + \frac{qy^4}{4} + qLxy^2 - \frac{2}{3}qLy^3 + Pxy^2 - \frac{2}{3}Py^3 \right]_0^x$$

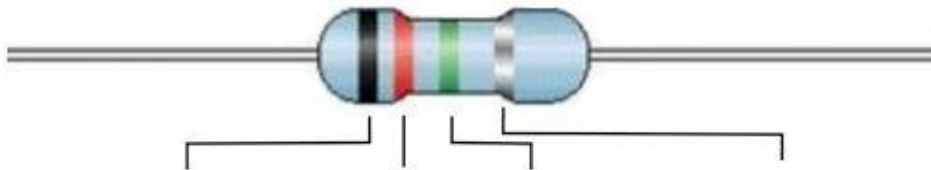
$$= \frac{1}{2EI_z} \left[-\frac{qL^2}{2}x^2 - PLx^2 - \frac{qx^4}{12} + \frac{qLx^3}{3} + \frac{Px^3}{3} \right] =$$

$$= \frac{x^2}{24EI_z} \left[-6qL^2 - 12PL - qx^2 + 4qLx + 4Px \right]$$

Il·lustració 4. Càlcul de la fletxa per la platina de poliestirè

A l'hora de realitzar els circuits elèctrics, és necessari saber com detectar el valor de les resistències elèctriques. Cadascuna d'aquestes té quatre bandes i s'identifiquen segons el color d'aquestes. Tot seguit, hi ha una taula (Figura 19. *Valor de les resistències segons el color de les bandes*) on s'observa el valor de les resistències segons el color de les bandes que les conformen.

Cal dir que totes les resistències utilitzades en els assaigs tenen una tolerància del 5%.



Color	1ra. Banda	2da. Banda	3ra. Banda Multiplicador	Tolerancia %
Negro	0	0	x1	
Cafe	1	1	x10	
Rojo	2	2	x100	2%
Naranja	3	3	x1000	
Amarillo	4	4	x10000	
Verde	5	5	x100000	
Azul	6	6	x1000000	
Violeta	7	7	x10000000	
Gris	8	8	x100000000	
Blanco	9	9	x1000000000	
				Dorado 5%
				Plata 10%

Circuitos Básicos

Figura 19. Valor de les resistències segons el color de les bandes. Font: electrontools

Al ser desconegut el valor de la resistència interna del transductor piezoelèctric i la tensió total generada per aquest degut al moviment de la platina i, conseqüentment, de l'element piezoelèctric, no es pot determinar el valor de les resistències que s'utilitzaran abans de començar amb els assaigs, així que el mètode d'actuació ha estat, primer de tot, posar una R_1 gran i una R_2 petita a la primera prova per cada platina i longitud i, a partir dels valors obtinguts, anar regulant el valor de les resistències fins que la resposta elèctrica llegida als borns de R_2 sigui vàlida, és a dir, la lectura del voltatge sigui inferior a 10 Volts, però pràcticament del mateix ordre de magnitud. Les resistències utilitzades en els assaigs es poden observar en el següent apartat: Resultats i discussió.

A la Figura 20. *Circuit tipus utilitzat* es pot observar el circuit tipus que s'utilitzarà en la majoria de casos. S'observa com la regleta de connexions té dues resistències (R_1 i R_2), equivalents a la resistència de càrrega, i quatre cables. R_1 seria la resistència amb un valor més elevat i és la que està situada entre els contactes 1 i 2. R_2 seria més petita i està situada entre els contactes 2 i 3. Els cables negres són els que surten dels borns del transductor piezoelèctric i estan situats entre els contactes 1 i 3. Els cables verds són els que surten del sistema d'adquisició i, per tant, les dades que s'enregistren és la diferència de potencial entre els contactes 2 i 3, als borns de R_2 , al llarg del temps.

Cal dir que en alguns casos, no ha estat necessària la connexió de R_1 per reduir la tensió als borns de R_2 ja que aquesta ja era el suficientment petita (menor a 10 Volts).

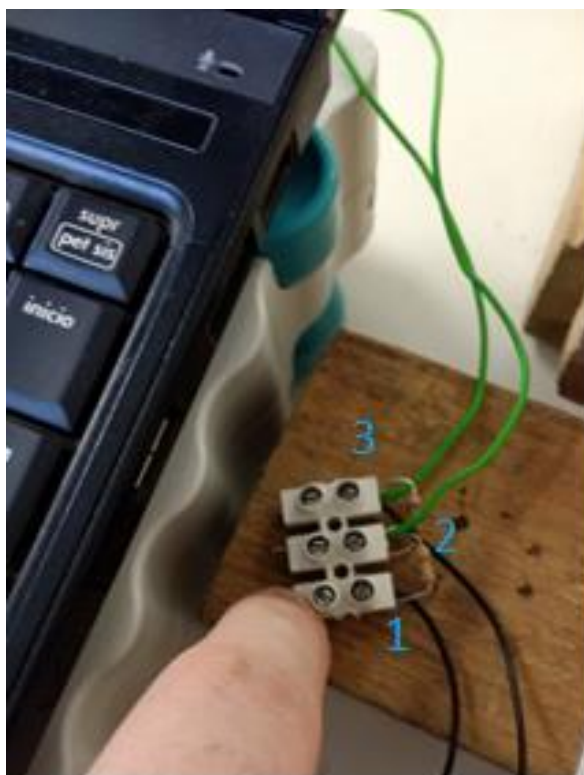


Figura 20. Circuit tipus utilitzat

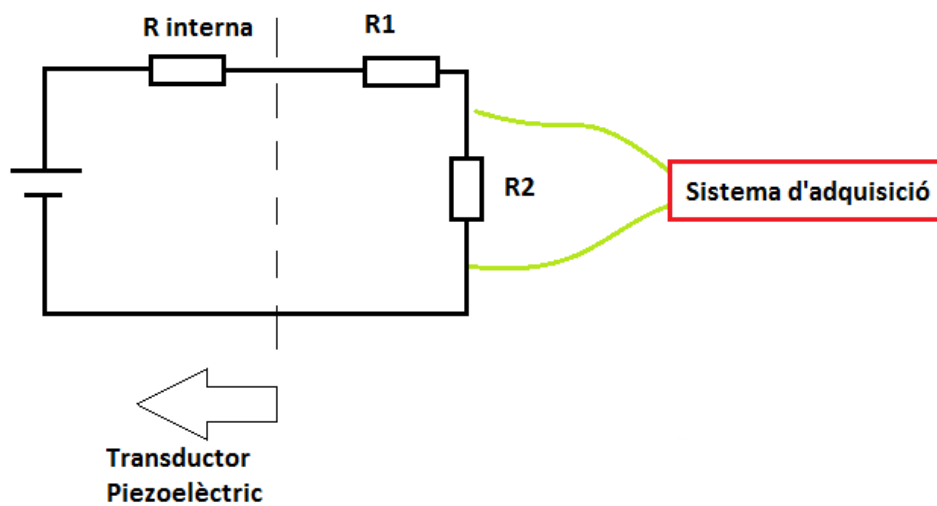


Figura 21. Circuit equivalent

A la Figura 21. *Circuit equivalent* es pot observar el circuit equivalent. La part esquerra seria l'equivalent al transductor piezoelèctric, per tant, els cables negres, pertanyents al transductor, estarien connectats al circuit "real" en la separació discontinua que es veu al circuit equivalent.

7 Resultats i discussió

7.1 Passos previs

Mitjançant les dades de voltatge enregistrades pel sistema d'adquisició als borns de R_2 , s'ha pogut obtenir la potència consumida per aquesta resistència, la diferència de potencial que s'estableix sobre $R_{càrrega}$ i la potència consumida per aquesta.

Com s'ha explicat en l'apartat Preparatori, la diferència de potencial de la resistència de càrrega es pot obtenir fent ús de la llei d'Ohm $V = R \cdot I$ ja que se sap que $V_2 = R_2 \cdot I$ perquè la intensitat és constant al llarg del circuit (veure Equació 1).

Una vegada se sàpiga el voltatge que consumeix cada part del circuit, la potència es pot calcular mitjançant l'Equació 2. Per tant, en el cas de R_2 , la potència consumida estarà descrita per l'Equació 3 i en el cas de $R_{càrrega}$ per l'Equació 4.

Els gràfics obtinguts de V_2 , P_2 , $V_{càrrega}$ i $P_{càrrega}$ es poden observar a l'Annex I. En aquests es pot apreciar que en cadascun hi ha dues línies verdes verticals i hi són per determinar el rang de temps que s'ha utilitzat per calcular la potència mitjana consumida per la resistència de càrrega.

Degut a que la lectura del voltatge consumit per R_2 al mètode de l'extrem lliure triga molt temps a arribar a la seva lectura final, que és zero, i a que les últimes dades de diferència de potencial enregistrades no són gaire importants ja que són molt petites, s'ha decidit descartar els resultats que tinguin un màxim, o mínim en valor absolut, en la seva respectiva oscil·lació inferior al 10% del voltatge màxim enregistrat per tal de que el valor de la potència mitjana no decaigui en excés.

Tot seguit es mostra un exemple (veure Figura 22. $V(t)$ sobre R_2 , Figura 23. $P(t)$ sobre R_2 , Figura 24. $V(t)$ sobre R_c i Figura 25. $P(t)$ sobre $R_{càrrega}$. Potència mitjana = $9,789 \mu W$. Energia total = $98,287 \mu J$) pertanyent a la platina d'alumini amb longitud de voladís 451 mm amb el mètode de l'extrem lliure utilitzant una $R_{càrrega}=320 \text{ k}\Omega$ i $R_2=100 \text{ k}\Omega$ aplicant una diferència d'alçada inicial de 5 mm:

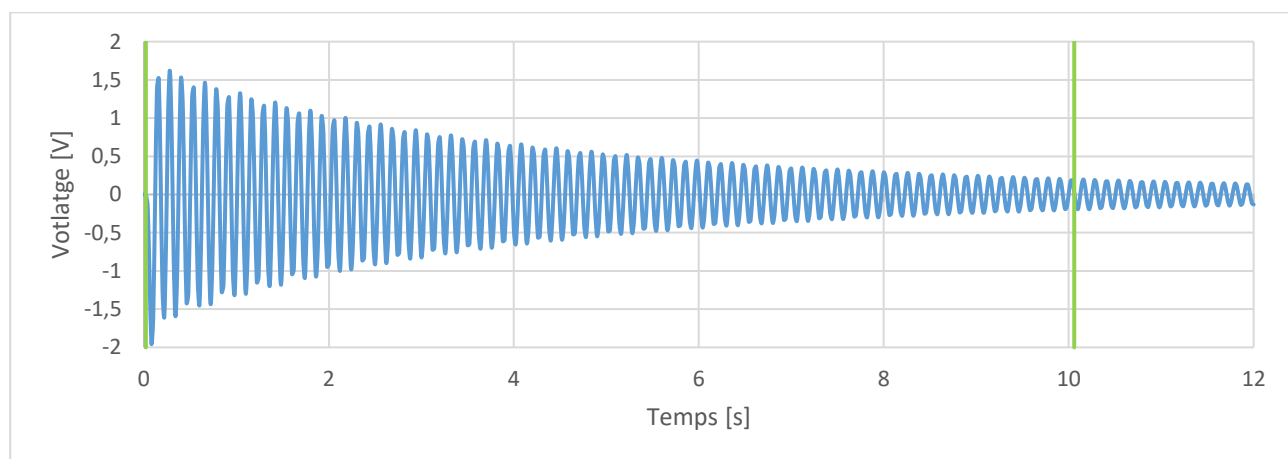


Figura 22. $V(t)$ sobre R_2

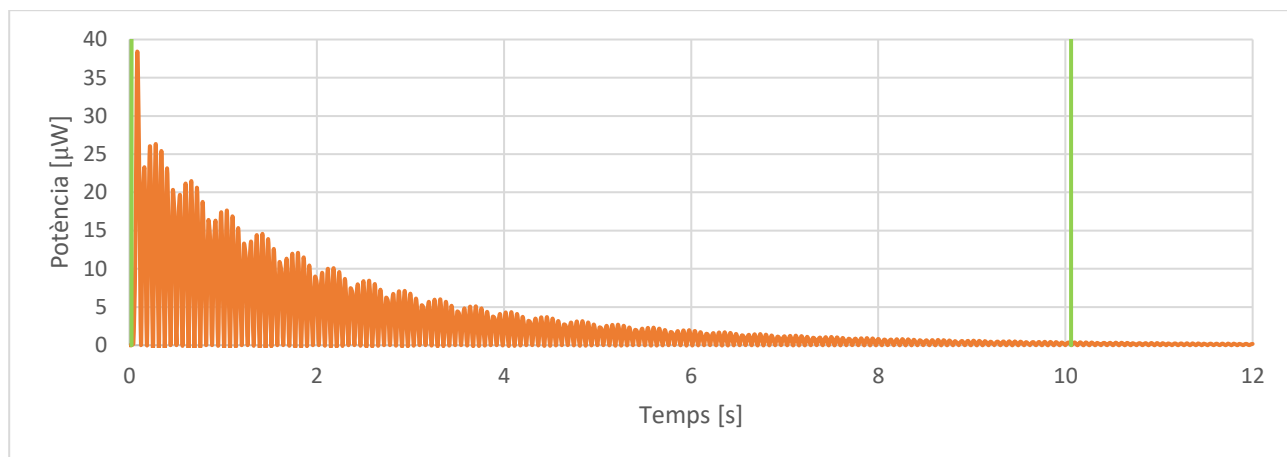


Figura 23. $P(t)$ sobre R2

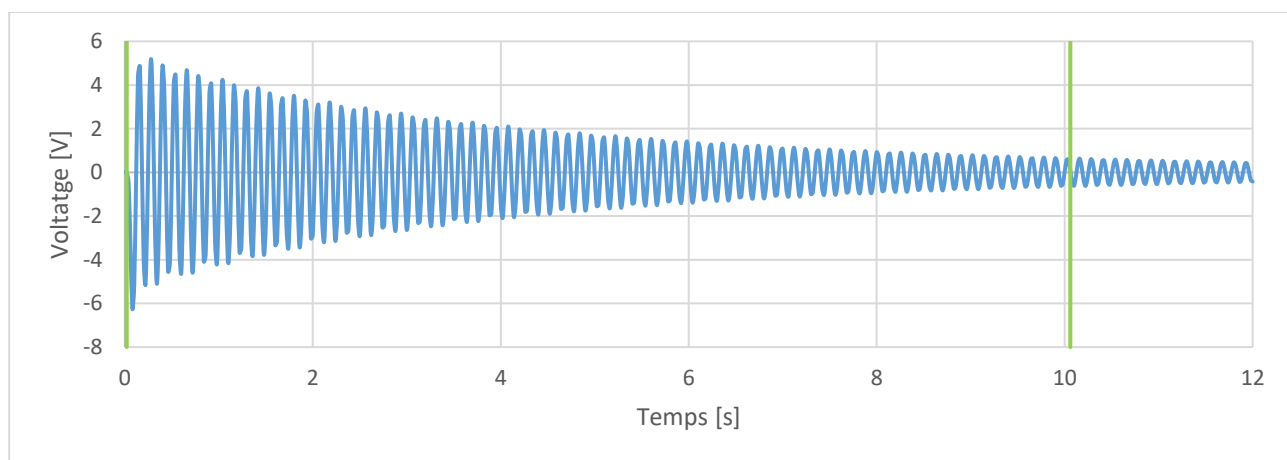


Figura 24. $V(t)$ sobre Rcàrrega

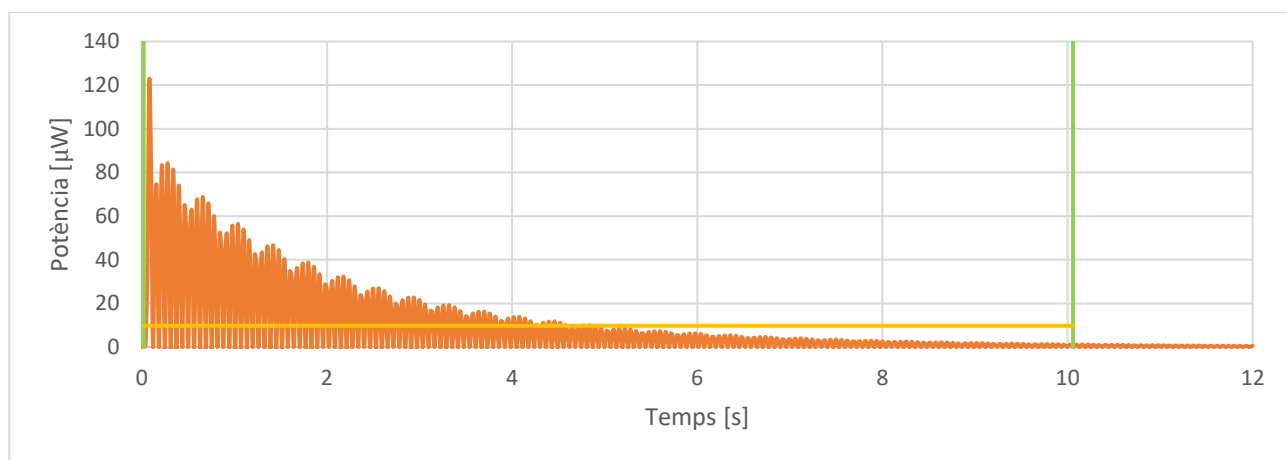


Figura 25. $P(t)$ sobre Rcàrrega. Potència mitjana = 9,789 μW . Energia total = 98,287 μJ



Com es pot observar a la Figura 25. $P(t)$ sobre $R_{càrrega}$. Potència mitjana = $9,789 \mu W$. Energia total = $98,287 \mu J$, tots els gràfics de l'Annex I que mostren la potència consumida per $R_{càrrega}$, tenen una línia horitzontal de color groc que representa la potència mitjana. A la Figura 26. Excel per calcular les dades de potència i voltatge es pot observar un full Excel amb els passos previs per poder calcular-la.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
47	=SI(B50*B51<0;"cambio";" ")			=SI(C50="cambio";A50+((-0,02*B50)/(B51-B50));"")								
48	a			b								
49						PotMicro\	PotRcMicro		PotMicro		V(Rcons)	PRcMirco
50	0	0	a	b	0	0	0		0		0	0
51	0,02	0			0,02	0	0		0		0	0
52	0,04	-0,086			0,04	0,7396	17,0108		0,7396		-1,978	17,0108
53	0,06	-0,4852			0,06	23,5419	541,4638		23,5419		-11,1596	541,4638
54	0,08	-0,4376	cambio	0,093752	0,08	19,14938	440,4356		19,14938		-10,0648	440,4356
55	0,1	0,1988			0,093752	0	0		3,952144		4,5724	90,89931
56	0,12	0,3248	cambio	0,131959	0,1	3,952144	90,89931		10,5495		7,4704	242,6386
57	0,14	-0,2184			0,12	10,5495	242,6386		4,769856		-5,0232	109,7067
58	0,16	-0,3584	cambio	0,173264	0,131959	0	0		12,84506		-8,2432	295,4363
59	0,18	0,182			0,14	4,769856	109,7067		3,3124		4,186	76,1852
60	0,2	0,3556	cambio	0,213945	0,16	12,84506	295,4363		12,64514		8,1788	290,8381
61	0,22	-0,1544			0,173264	0	0		2,383936		-3,5512	54,83053
62	0,24	-0,3636	cambio	0,254841	0,18	3,3124	76,1852		13,2205		-8,3628	304,0714
63	0,26	0,1264			0,2	12,64514	290,8381		1,597696		2,9072	36,74701
64	0,28	0,3616	cambio	0,295708	0,213945	0	0		13,07546		8,3168	300,7355
65	0,3	-0,0988			0,22	2,383936	54,83053		0,976144		-2,2724	22,45131
66	0,32	-0,3636	cambio	0,336679	0,24	13,2205	304,0714		13,2205		-8,3628	304,0714
67	0,34	0,0724			0,254841	0	0		0,524176		1,6652	12,05605
68	0,36	0,3588	cambio	0,37771	0,26	1,597696	36,74701		12,87374		8,2524	296,0961
69	0,38	-0,0464			0,28	13,07546	300,7355		0,215296		-1,0672	4,951808

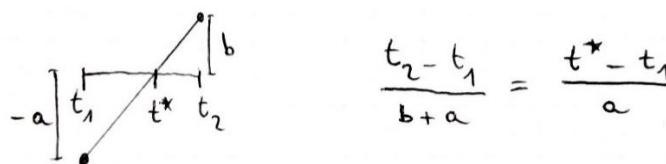
Figura 26. Excel per calcular les dades de potència i voltatge

A la columna A es pot observar el temps enregistrat pel sistema d'adquisició, a la columna B les dades de voltatge als borns de R_2 , a la columna I la potència consumida per aquesta, a la columna K la diferència de potencial sobre la resistència de càrrega i a la columna L la potència consumida per aquesta. Per tant, aquestes són les dades originals i les que s'han tingut en compte a l'hora de graficar les dades de voltatge.

Per poder determinar la potència mitjana consumida per la resistència de càrrega, ha estat necessari trobar els punts on la potència era zero (mínims). Aquests s'han obtingut aplicant diverses vegades la fórmula SI al full Excel sobre les dades de voltatge ja que quan $V = 0 \rightarrow P = 0$.

A la columna C s'aplica una fórmula SI de tal manera que, si una dada de diferència de potencial sobre R_2 multiplicada per la següent dada de voltatge donava un resultat negatiu, a la cel·la hi posaria la

paraula “cambio”. A la columna D s’aplica una altra fórmula SI i especifica que si la cel·la del costat pertanyent a la columna C conté la paraula “cambio” s’utilitza una fórmula, que aplica el teorema de Tales (veure Il·lustració 5. *Teorema de Tales*), que troba el temps en que el voltatge és 0. Per fer-ho es considera que el recorregut que fa el voltatge per aquest petit tram de temps (la inversa de la freqüència del sistema d’adquisició), en el cas de la Figura 26. *Excel per calcular les dades de potència i voltatge 0,02 segons*, és en línia recta.

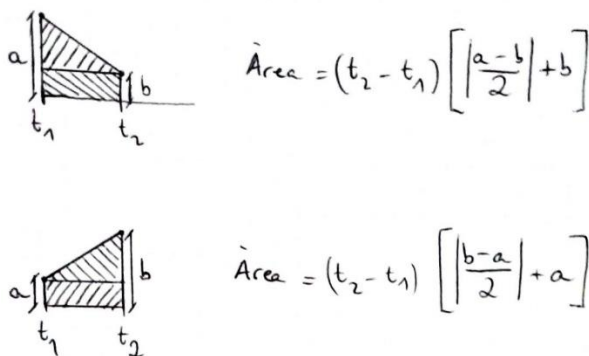


Il·lustració 5. Teorema de Tales

Una vegada realitzat aquest pas, s’han copiat les columnes A, I i L i s’han enganxat a les columnes E, F i G respectivament. Evidentment només s’han copiat les dades que formaran part dels gràfics. Per incloure els nous punts trobats, s’ha copiat la columna D i s’ha posat a sota de les dades de temps de la columna E. Llavors aplicant una altra funció SI s’han omplert de zeros les dades de les potències buides pertanyent als nous punts. Com últim pas, s’han seleccionat totes les dades de les columnes E, F i G i s’ha clicat el botó de “ordenar y filtrar” i “de menor a major”. Amb aquestes noves dades s’han realitzat els gràfics de potències.

Degut a que la potència és la derivada temporal de l’energia $P = \frac{dE}{dt}$, l’àrea sota la corba de $P(t)$ sobre la resistència consum és l’energia consumida. Per tant, s’ha utilitzat aquesta fórmula per calcular finalment la potència mitjana consumida.

S’ha calculat l’energia a cada tram dintre del rang de temps (línies verdes verticals) establert. Per fer-ho s’ha considerat que el recorregut d’un valor de potència al següent valor al llarg del temps és una línia recta i s’ha aplicat aquesta fórmula: $=SI(G50>G49;((ABS(G50-G49)/2)+G49)*0,02;((ABS(G50-G49)/2)+G50)*0,02)$ a partir de la fila 50. Aquesta expressió estableix que l’àrea varia segons si la potència consumida per la resistència de càrrega augmenta o disminueix en aquest determinat moment de temps. Això es pot veure a la Il·lustració 6. *Àrea varia segons si la funció augmenta o disminueix*.



Il·lustració 6. Àrea varia segons si la funció augmenta o disminueix

Un cop se sap l'aportació d'energia consumida a cada tram, es pot saber l'energia total consumida aplicant un sumatori. L'últim pas per poder calcular la potència mitjana és dividir aquesta energia total entre el rang de temps establert.

7.2 Resultats

Amb els resultats que es mostraran a continuació es pot calcular la resistència interna del transductor piezoelèctric. Considerant que el voltatge generat a una mateixa freqüència de l'excèntrica (si es tracta del mètode de l'excèntrica), o diferència d'alçada inicial (si es tracta del mètode de l'extrem lliure) pel mateix tipus i longitud de platina és idèntic, es pot aïllar la resistència interna del transductor igualant la incògnita del voltatge generat pel piezoelèctric. S'ha decidit que les úniques dades vàlides per tal de calcular-la són les aplicades amb el mètode de l'excèntrica ja que al mètode de l'extrem lliure, el valor de la potència mitjana depèn del rang de temps que s'estableixi. Per aquest motiu, les taules que expressen els resultats obtinguts pel mètode de l'excèntrica també inclouen el valor de la intensitat mitjana en cada cas, que ha estat calculada mitjançant l'Equació 27.

$$P = I^2 \cdot R \rightarrow I^2 = \frac{P}{R} \rightarrow I = \sqrt{P/R} \quad \text{Equació 27}$$

A continuació es posarà un exemple sobre com calcular la resistència interna del transductor piezoelèctric tenint unes certes dades de resistències, freqüències, potències i intensitats:

Exemple de càlcul de Rint

Poliestirè Long 1, mètode de l'excèntrica				
Rcàrrega [KΩ]	Resistències [KΩ]	Freqüència [Hz]	Potència [μW]	Intensitat [A]
120	R1=0 R2=120	1,485	1,891	3,96949E-06
		2,535	4,381	6,04228E-06
		3,486	7,481	7,89581E-06
220	R1=0 R2=220	1,447	1,745	2,81597E-06
		2,549	4,71	4,62724E-06
		3,428	7,766	5,94123E-06

Taula 2. Dades de l'Exemple

Primer de tot, per poder comparar els resultats de ambdues resistències, cal suposar que la freqüència 1 de una és igual a la freqüència 1 de l'altra i, el mateix per la 2 i la 3. Es pot observar que en realitat són pràcticament idèntiques.

Mitjançant la llei d'Ohm es trobarà l'expressió que permeti relacionar

$$V_{generat} = I \cdot (R_{càrrega} \cdot R_{int}) \quad \text{Equació 28}$$

Per la freqüència 1:

$$R_{càrrega} = 120 \text{ k}\Omega$$

$$V_{generat} = I_{1,120} \cdot (R_{càrrega,120} + R_{int}) = 3,969 \cdot 10^{-6} \cdot (120 \cdot 10^3 + R_{int}) \quad \text{Equació 29}$$

$$R_{càrrega} = 220 \text{ k}\Omega$$

$$V_{generat} = I_{1,220} \cdot (R_{càrrega,220} + R_{int}) = 2,816 \cdot 10^{-6} \cdot (220 \cdot 10^3 + R_{int}) \quad \text{Equació 30}$$

Ara s'igualen les dues equacions per aïllar R_{int} .

$$\begin{aligned}
 I_{1,120} \cdot (R_{càrrega,120} + R_{int}) &= I_{1,220} \cdot (R_{càrrega,220} + R_{int}) \\
 &\rightarrow I_{1,120} \cdot R_{càrrega,120} + I_{1,120} \cdot R_{int} \\
 &= I_{1,220} \cdot R_{càrrega,220} + I_{1,220} \cdot R_{int} \\
 &\rightarrow I_{1,120} \cdot R_{càrrega,120} - I_{1,220} \cdot R_{càrrega,220} \\
 &= I_{1,220} \cdot R_{int} - I_{1,120} \cdot R_{int} \rightarrow R_{int} \\
 &= \left| \frac{I_{1,120} \cdot R_{càrrega,120} - I_{1,220} \cdot R_{càrrega,220}}{I_{1,220} - I_{1,120}} \right|
 \end{aligned}$$

Equació 31

En el cas de l'exemple,

$$\begin{aligned}
 R_{int} &= \left| \frac{I_{1,120} \cdot R_{càrrega,120} - I_{1,220} \cdot R_{càrrega,220}}{I_{1,220} - I_{1,120}} \right| \\
 &= \left| \frac{3,969 \cdot 10^{-6} \cdot 120 - 2,816 \cdot 10^{-6} \cdot 220}{2,816 \cdot 10^{-6} - 3,969 \cdot 10^{-6}} \right| = \\
 &\quad 124,12 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Equació 32

Per obtenir una bona mesura de la resistència interna del transductor caldria calcular-la per les demés freqüències i després fer la mitjana.

A continuació es mostren les taules amb els resultats de la potència mitjana per cada platina, mètode i resistències utilitzades i les taules amb el valor de la resistència interna calculada. A més a més, s'han afegit uns gràfics que representen de forma més visual les diferències de la potència mitjana segons el valor de les resistències de càrrega utilitzades. Al final de cada un dels següents apartats (Platina de poliestirè amb mètode de l'excèntrica, Platina d'alumini amb mètode de l'excèntrica, Platina de poliestirè amb mètode de l'extrem lliure i Platina d'alumini amb mètode de l'extrem lliure) hi haurà una petita explicació analitzant els resultats i comparant-los.

Cal dir que les freqüències aplicades per l'excèntrica tenen uns valors bastant baixos i això es degut a que aquesta no arribava a la freqüència desitjada. El disc de l'excèntrica girava, aproximadament, a la meitat de revolucions del que se l'indicava.



7.2.1 Platina de poliestirè amb mètode de l'excèntrica

7.2.1.1 Longitud 1

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 1.

Poliestirè Long 1, mètode de l'excèntrica				
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Freqüència [Hz]	Potència [μW]	Intensitat [A]
120	R1=0 R2=120	1,485	1,891	3,96E-06
		2,535	4,381	6,04E-06
		3,486	7,481	7,89E-06
220	R1=0 R2=220	1,447	1,745	2,81E-06
		2,549	4,71	4,62E-06
		3,428	7,766	5,94E-06
680	R1=0 R2=680	1,418	1,14	1,29E-06
		2,488	3,123	2,14E-06
		3,436	5,463	2,83E-06
1000	R1=0 R2=1000	1,425	0,996	9,97E-07
		2,517	2,541	1,59E-06
		2,941	3,552	1,88E-06

Taula 3. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'excèntrica

La següent taula mostra el càlcul de la resistència interna del transductor segons les resistències i freqüències comparades.

$R_{càrrega}$ comparades [$K\Omega$]	R_{int} freq1[$K\Omega$]	R_{int} freq2[$K\Omega$]	R_{int} freq3[$K\Omega$]
120 i 220	124,1200338	207,004751	183,9638991
120 i 680	151,128363	187,8046381	193,5818824
120 i 1000	175,4967554	195,3928522	
220 i 680	171,6106065	176,8674537	199,6325805
220 i 1000	208,0930899	189,9754313	
680 i 1000	394,8940091	249,2899924	

Taula 4. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina de poliestirè de longitud 1

Es pot observar que la freqüència 3 de $R_{càrrega} = 1000 \text{ k}\Omega$ no s'ha tingut en compte a l'hora de fer el càlcul ja que és bastant inferior al que hauria de ser.

La resistència interna mitjana calculada del transductor piezoelèctric per la longitud 1 és de 200,5904226 $k\Omega$.

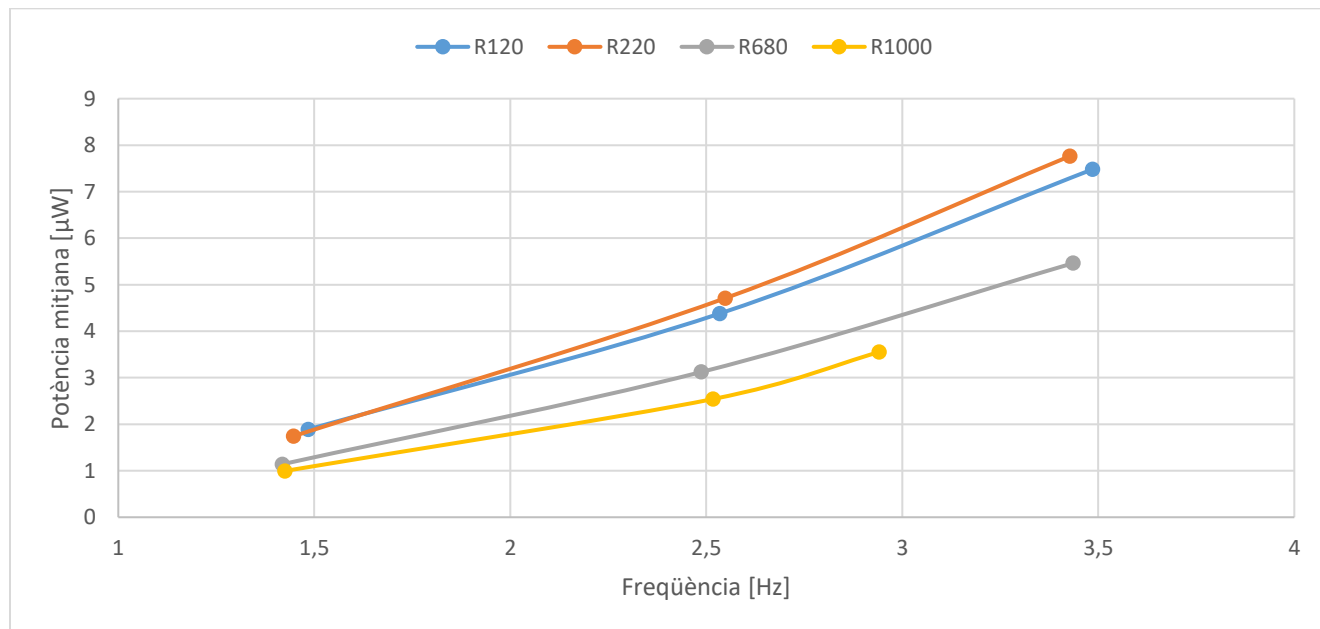


Figura 27. Potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica

7.2.1.2 Longitud 2

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 2.

Poliestirè Long 2, mètode de l'excèntrica				
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Freqüència [Hz]	Potència [μW]	Intensitat [A]
120	R1=0 R2=120	1,553672243	3,311885333	5,25348E-06
		2,454780245	8,505699893	8,41908E-06
		3,436018794	16,80819122	1,1835E-05
220	R1=0 R2=220	1,418439649	3,060239785	3,72964E-06
		2,499999881	9,553896501	6,5899E-06
		3,411764544	17,9007781	9,02038E-06
680	R1=0 R2=680	1,467268553	2,430389218	1,89053E-06
		2,47747736	6,779635852	3,15754E-06
		3,419811158	12,73122586	4,32694E-06
1000	R1=0 R2=1000	1,42517808	1,859087455	1,36348E-06
		2,506265545	5,612196122	2,36901E-06
		2,955664884	7,546845392	2,74715E-06

Taula 5. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'excèntrica

La següent taula mostra el càlcul de la resistència interna del transductor segons les resistències i freqüències comparades.

R _{càrrega} comparades [KΩ]	R _{int} freq1[KΩ]	R _{int} freq2[KΩ]	R _{int} freq3[KΩ]
120 i 220	124,7518253	240,2665268	200,4773895
120 i 680	194,8118742	216,0656841	202,7292229
120 i 1000	188,4490674	224,5790179	
220 i 680	252,8621286	203,1685756	204,0796541
220 i 1000	229,4712207	217,780652	
680 i 1000	147,8495698	281,3848778	

Taula 6. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina de poliestirè de longitud 2

Com en l'anterior cas, la freqüència 3 de $R_{càrrega} = 1000 \text{ k}\Omega$ tampoc s'ha tingut en compte.

La resistència interna mitjana calculada del transductor piezoelèctric per la longitud 2 és de 208,5818191 k Ω .

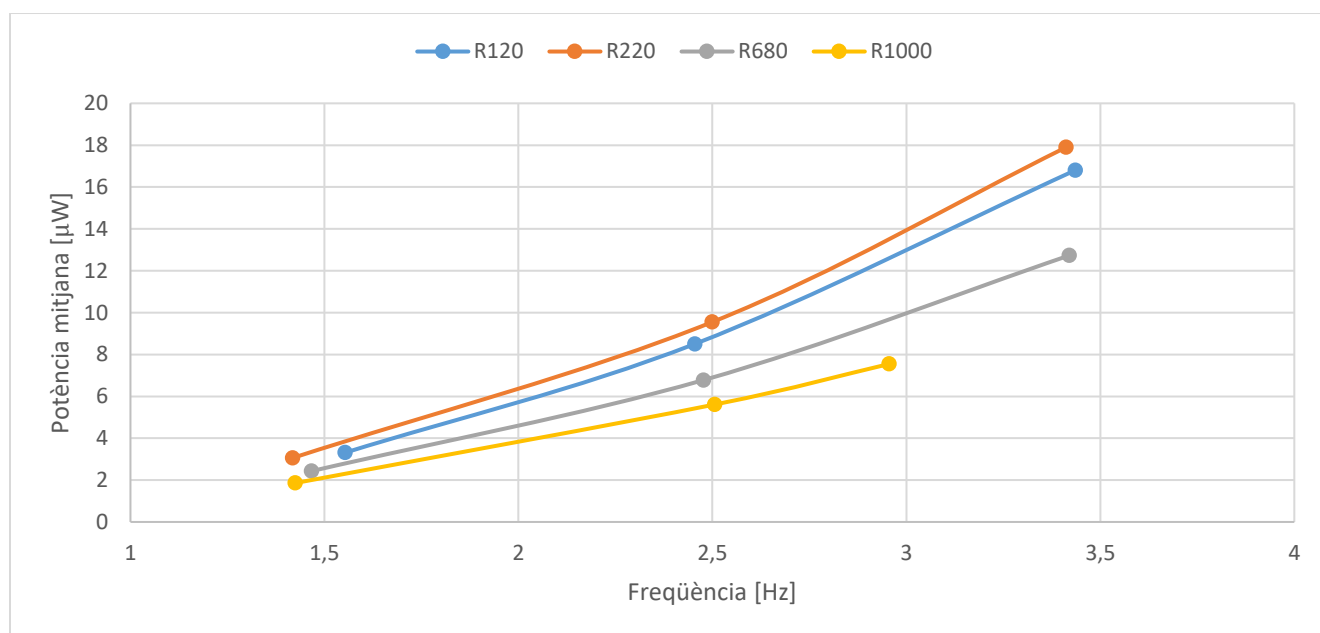


Figura 28. Potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica

7.2.1.3 Longitud 3

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 3.



Poliestirè Long 3, mètode de l'excèntrica				
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Freqüència [Hz]	Potència [μW]	Intensitat [A]
120	R1=0 R2=120	1,418439649	6,095775701	7,12728E-06
		2,499999881	17,66075364	1,21315E-05
		3,419811158	34,25646266	1,68959E-05
220	R1=0 R2=220	1,538461465	7,815460094	5,96027E-06
		2,441860349	18,82687361	9,25077E-06
		3,37499984	36,15183885	1,2819E-05
680	R1=0 R2=680	1,485148444	5,63212615	2,87794E-06
		2,494061639	14,47934722	4,61445E-06
		3,349282138	25,66648757	6,14368E-06
1000	R1=0 R2=1000	1,445783064	4,317072464	2,07776E-06
		2,511961603	11,66474774	3,41537E-06
		2,955082602	15,75191043	3,96887E-06
		3,452380788	22,22578836	4,71442E-06

Taula 7. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'excèntrica

La següent taula mostra el càlcul de la resistència interna del transductor segons les resistències i freqüències comparades.

R _{càrrega} comparades [KΩ]	R _{int} freq1[KΩ]	R _{int} freq2[KΩ]	R _{int} freq3[KΩ]
120 i 220	390,7296644	201,1271069	194,4312939
120 i 680	259,2697422	223,7648759	199,9777963
120 i 1000	242,098635	224,8238725	220,5746277
220 i 680	209,4972848	237,8305757	203,3652699
220 i 1000	197,4229344	236,5220816	233,7256402
680 i 1000	150,9121788	231,4627158	375,5227819

Taula 8. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina de poliestirè de longitud 3

La resistència interna mitjana calculada del transductor piezoelèctric per la longitud 3 és de 235,1699488 k Ω .

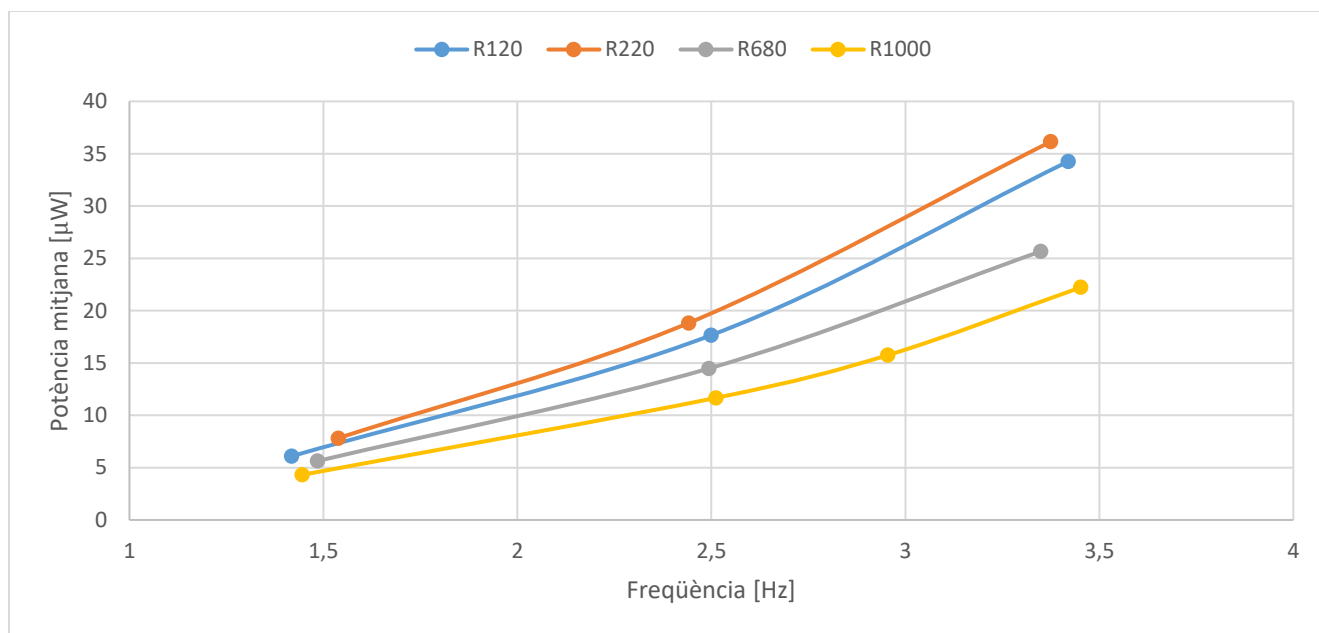


Figura 29. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica

7.2.1.4 Explicació

Es pot observar que els tres gràfics representats (Figura 27. *Potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*, Figura 28. *Potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*, Figura 29. *Potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*) són molt similars. En els tres es pot veure com, a mesura que la freqüència de l'excèntrica augmenta, el valor de la potència mitjana també ho fa. També incrementa, en major mesura, quan s'acurta la longitud de la platina. S'observa que, aproximadament, el valor de la potència mitjana és duplica cada vegada que la platina es talla (90 mm).

La mitjana de la resistència interna calculada del transductor piezoelèctric tenint en compte les tres longituds és de 214,78 k Ω , que arrodonint: $R_{int} = 215 \text{ k}\Omega$.

Ara que se sap el valor aproximat de la resistència interna del transductor piezoelèctric, es calcularà per quin valor de $R_{càrrega}$, la potència serà màxima. Per determinar-ho s'utilitzarà l'Equació 33.

$$P_{R_{càrrega}} = I^2 \cdot R_{càrrega} = \frac{V_{generat}^2}{(R_{int} + R_{càrrega})^2} \cdot R_{càrrega} \quad \text{Equació 33}$$

Com que es busca la potència màxima, la derivada d'aquesta respecte $R_{càrrega}$ serà nul·la.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dR_{càrrega}} = 0 &\rightarrow \frac{V_{generat}^2}{(R_{int} + R_{càrrega})^2} - 2 \cdot R_{càrrega} \frac{V_{generat}^2}{(R_{int} + R_{càrrega})^3} = 0 \\ &\rightarrow \frac{V_{generat}^2 \cdot (R_{int} + R_{càrrega}) - 2 \cdot R_{càrrega} \cdot V_{generat}^2}{(R_{int} + R_{càrrega})^3} = 0 \quad \text{Equació 34} \\ &\rightarrow V_{generat}^2 \cdot (R_{int} + R_{càrrega}) - 2 \cdot R_{càrrega} \cdot V_{generat}^2 = 0 \\ &\rightarrow (R_{int} + R_{càrrega}) - 2 \cdot R_{càrrega} = 0 \rightarrow R_{int} = R_{càrrega} \end{aligned}$$

S'ha determinat que la resistència de càrrega que fa màxima la potència és el mateix valor que la resistència interna del transductor piezoelèctric, 215 kΩ. Coneixent aquesta dada, si es cregués oportú es podria calcular el voltatge generat a cada assaig mitjançant la llei d'Ohm.

$$V_{generat} = (R_{càrrega} + R_{int}) \cdot I \quad \text{Equació 35}$$

En les gràfiques s'observa que l'ordre de la resistència de càrrega segons la potència mitjana consumida es manté per totes les freqüències i longituds. Ordenades de major a menor són: $R_c = 220$ kΩ, 120 kΩ, 680 kΩ i 1 MΩ.

L'ordre és coherent ja que la resistència consum de 220 kΩ és molt pròxima a la resistència de càrrega òptima, considerant com òptima la variable que fa que la potència consumida sigui màxima.



7.2.2 *Platina d'alumini amb mètode de l'excèntrica*

7.2.2.1 Longitud 1

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 1.

Alumini Long 1, mètode de l'excèntrica				
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Freqüència [Hz]	Potència [μW]	Intensitat [A]
510	R1=390 R2=120	3,708133795	418,6947385	2,86526E-05
		5,655526724	578,8960657	3,36911E-05
		7,608695291	607,1225796	3,45027E-05
660	R1=560 R2=100	3,667481488	431,3235618	2,5564E-05
		5,641025373	549,2288726	2,88473E-05
		7,493539696	584,1030951	2,9749E-05
1000	R1=820 R2=180	3,690476015	245,3587233	1,56639E-05
		5,655526724	280,8983972	1,676E-05
		7,512953011	285,3068262	1,6891E-05

Taula 9. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'excèntrica

La següent taula mostra el càlcul de la resistència interna del transductor segons les resistències i freqüències comparades.

R _{càrrega} comparades [KΩ]	R _{int} freq1[KΩ]	R _{int} freq2[KΩ]	R _{int} freq3[KΩ]
510 i 600	731,5648901	383,3196648	428,7170457
510 i 1000	80,92585715	24,95045043	40,05013605
600 i 1000	122,0532009	188,5602516	213,3559392

Taula 10. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina d'alumini de longitud 1

La resistència interna mitjana calculada del transductor piezoelèctric per la longitud 1 és de 245,9441595 kΩ.

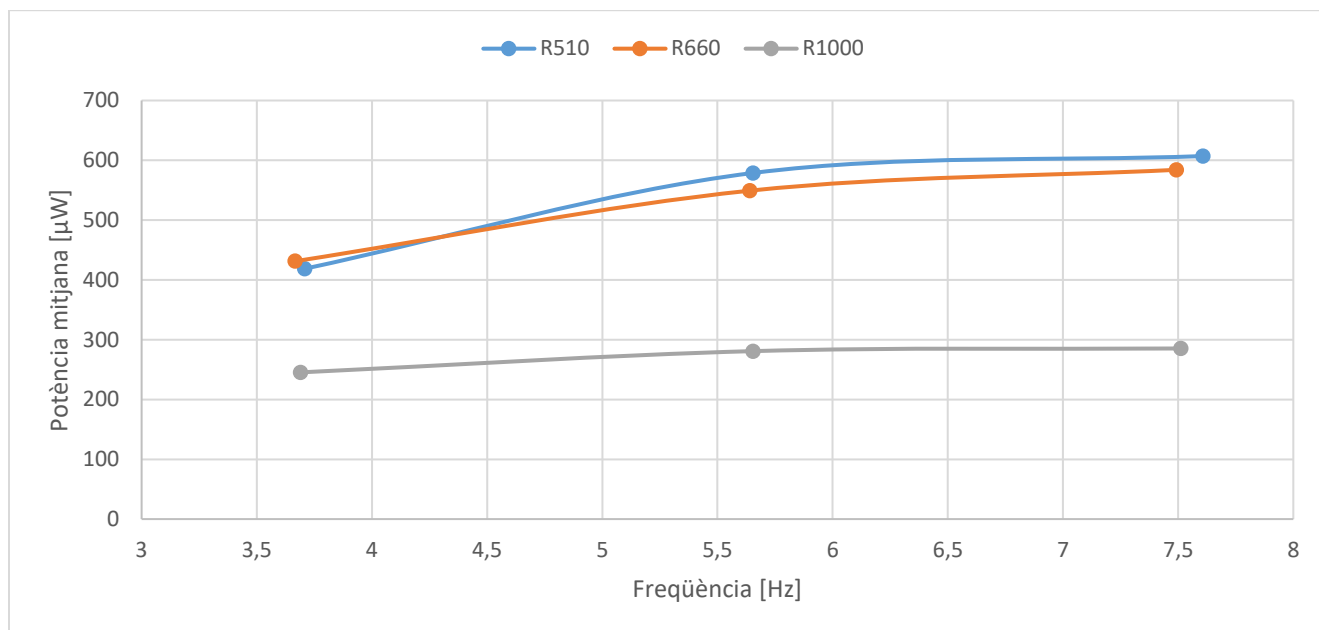


Figura 30. Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica

7.2.2.2 Longitud 2

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 2.

Alumini Long 2, mètode de l'excèntrica				
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Freqüència [Hz]	Potència [μW]	Intensitat [A]
230	R1=220 R2=10	3,64705865	727,2857323	5,62327E-05
		5,595237829	1278,157968	7,45467E-05
		7,622738656	1563,547446	8,24502E-05
402	R1=390 R2=12	3,678160745	794,3568468	4,44524E-05
		5,693069037	1259,644915	5,59772E-05
		7,622738656	1074,460979	5,1699E-05
570	R1=560 R2=10	3,617570888	902,6068478	3,97935E-05
		5,725190568	692,8848482	3,48653E-05
		7,640750307	773,4013021	3,68354E-05
838	R1=820 R2=18	3,688524415	503,136779	2,45031E-05
		5,639097477	564,6927843	2,59588E-05
		7,571801207	516,1980741	2,48191E-05

Taula 11. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'excèntrica

La següent taula mostra el càlcul de la resistència interna del transductor segons les resistències i freqüències comparades.

R _{càrrega} comparades [KΩ]	R _{int} freq1[KΩ]	R _{int} freq2[KΩ]	R _{int} freq3[KΩ]
230 i 402	419,0330954	288,4885775	59,16731506
230 i 570	593,020405	68,73417685	44,56049252
230 i 838	239,5269949	94,83244944	31,83823098
402 i 570	1032,959343	124,556274	14,34067527
402 i 1000	133,5262611	24,96396111	0,573203662
570 i 1000	140,5252669	211,1088337	16,45662708

Taula 12. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina d'alumini de longitud 2

La resistència interna mitjana calculada del transductor piezoelèctric per la longitud 2 és de 196,5673435 kΩ.

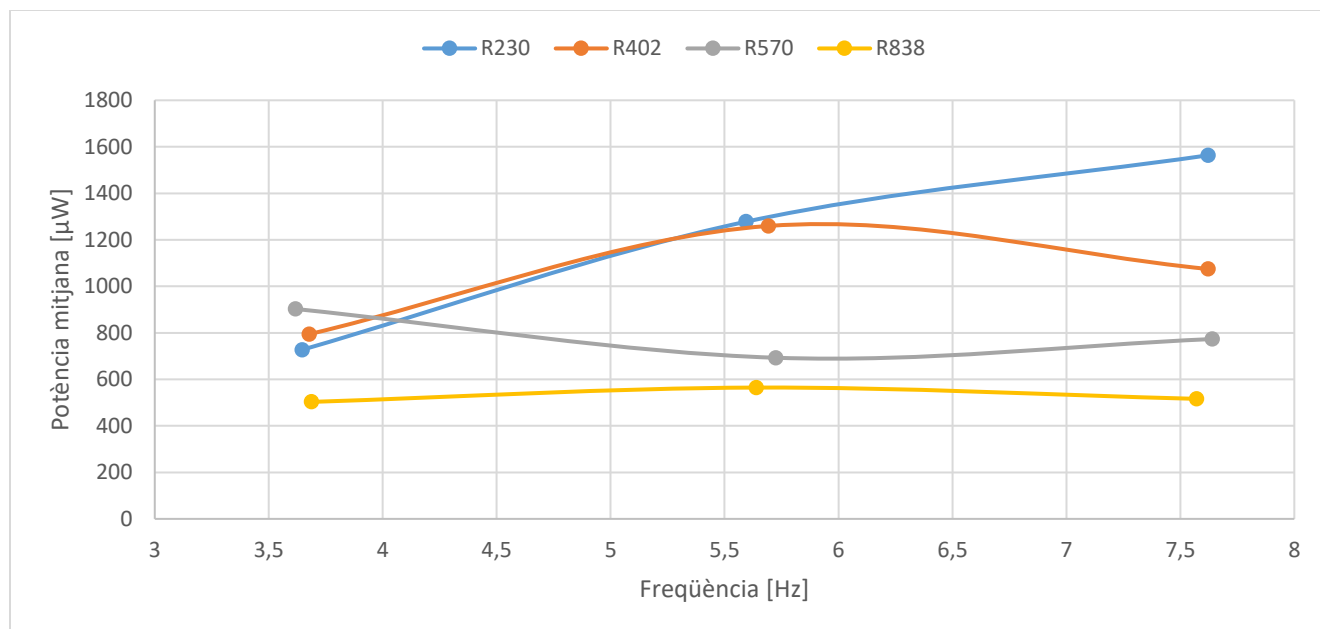


Figura 31. Potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica

7.2.2.3 Longitud 3

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 3.

Alumini Long 3, mètode de l'excèntrica				
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Freqüència [Hz]	Potència [μW]	Intensitat [A]
230	R1=220 R2=10	3,846153663	2524,308265	0,000104763
		5,808080532	2758,481526	0,000109514
		7,682619282	2637,926678	0,000107095
402	R1=390 R2=12	3,819444263	1263,902614	5,60717E-05
		5,831265232	1215,047929	5,49773E-05
		7,672633907	1033,003163	5,06918E-05
570	R1=560 R2=10	3,794642677	1555,600743	5,2241E-05
		5,816831407	1278,984556	4,73691E-05
		7,633587424	783,7219556	3,70803E-05
838	R1=820 R2=18	3,800474879	704,1342104	2,89872E-05
		5,87467335	654,9455269	2,79564E-05
		7,653060861	598,316472	2,67204E-05

Taula 13. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'excèntrica

La següent taula mostra el càlcul de la resistència interna del transductor segons les resistències i freqüències comparades.

R _{càrrega} comparades [KΩ]	R _{int} freq1[KΩ]	R _{int} freq2[KΩ]	R _{int} freq3[KΩ]
230 i 402	31,92835002	56,61138761	75,41551331
230 i 570	108,1822129	29,15888662	49,93217235
230 i 838	2,583793095	21,59050192	27,87002033
402 i 570	1889,100623	643,9746984	55,66476424
402 i 1000	64,62786668	49,09293039	84,00076464
570 i 1000	235,9238121	184,0524776	121,2303743

Taula 14. Càlcul de la resistència interna del transductor piezoelèctric per la platina d'alumini de longitud 3

La resistència interna mitjana calculada del transductor piezoelèctric per la longitud 3 és de 207,2745083 kΩ.

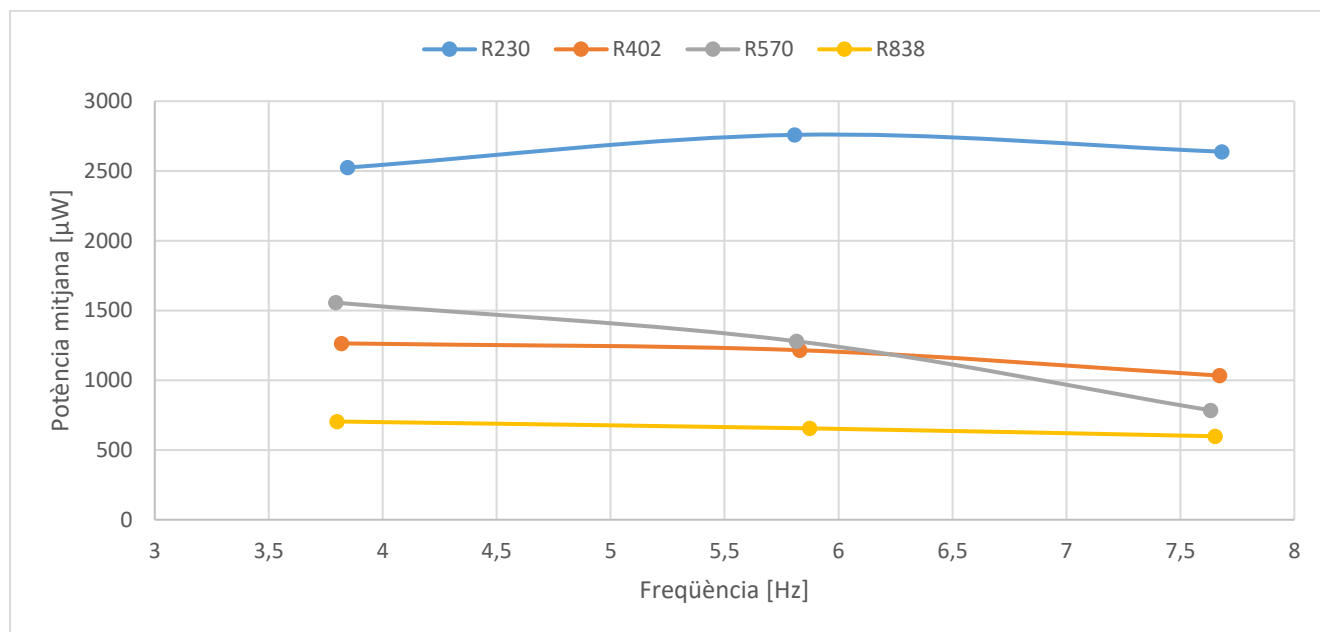


Figura 32. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica

7.2.2.4 Explicació

Observant els tres gràfics (Figura 30. *Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*, Figura 31. *Potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*, Figura 32. *Potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*), es pot determinar que a l'acurtar la longitud de la platina, la potència mitjana augmenta. Tanmateix, es pot observar en diversos casos que augmentar la freqüència de l'excèntrica no significa augmentar la potència.

Per la platina d'alumini, s'ha determinat que la resistència interna mitjana del transductor piezoelèctric és de 216,5953371 kΩ. Degut a que aquesta dada és molt similar que per la platina de poliestirè i per unificar mesures, s'arrodonirà a 215 kΩ.

Coneixent aquesta dada, si es cregués oportú, es podria calcular el voltatge generat a cada assaig mitjançant la llei d'Ohm: $V_{generat} = (R_{consum} + R_{int}) \cdot I$

Es pot observar que a la Figura 30. *Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*, la potència mitjana augmenta lentament a mesura que la freqüència incrementa, encara que es pot observar que per valors de resistència de càrrega superiors a 1 M Ω , això deixa de complir-se. Per les resistències de càrrega que ho compleixen, s'aprecia que una vegada la freqüència de l'excèntrica arriba a aproximadament 7,5 Hz, la potència deixa de pujar.

A la Figura 31. *Potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica* es pot observar que per freqüències petites, la potència mitjana és similar per totes les resistències consum. En aquest cas, succeeix un fet semblant al que passa a la Figura 30. *Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica*, i és que per valors de resistència de càrrega inferiors a un cert valor (aproximadament 570 k Ω) convé augmentar la freqüència per incrementar la potència, mentre que per valors de resistències de càrrega pertanyents al rang [570 k Ω ; 838 k Ω] no. Es desconeix si per resistències de càrrega superiors a 838 k Ω la potència es manté o disminueix a mesura que la freqüència augmenta.

S'observa que a mesura que s'augmenta la freqüència el valor de la potència mitjana consumida per cada resistència de càrrega s'ordena coherentment, essent les resistències de càrrega amb valor més pròxim a la resistència interna del transductor piezoelèctric les que més potència consumeixen (veure la demostració a l'Equació 34).

A la Figura 32. *Potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini en funció de la freqüència utilitzada per l'excèntrica* es pot observar que en gairebé tots els casos, la potència disminueix a mesura que augmenta la freqüència, tot i que la variació és mínima.



7.2.3 *Platina de poliestirè amb mètode de l'extrem lliure*

7.2.3.1 Longitud 1

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 1.

Poliestirè Long 1, mètode de l'extrem lliure			
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Dif. Alçada [cm]	Potència [μW]
120	R1=0 R2=120	1	0,057243711
		2	0,149361867
		3	0,408094544
220	R1=0 R2=220	1	0,093252399
		2	0,196184649
		3	0,551949192
680	R1=0 R2=680	1	0,045836639
		2	0,151751727
		3	0,302297549
1000	R1=0 R2=1000	1	0,064193536
		2	0,133261418
		3	0,257078309

Taula 15. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure

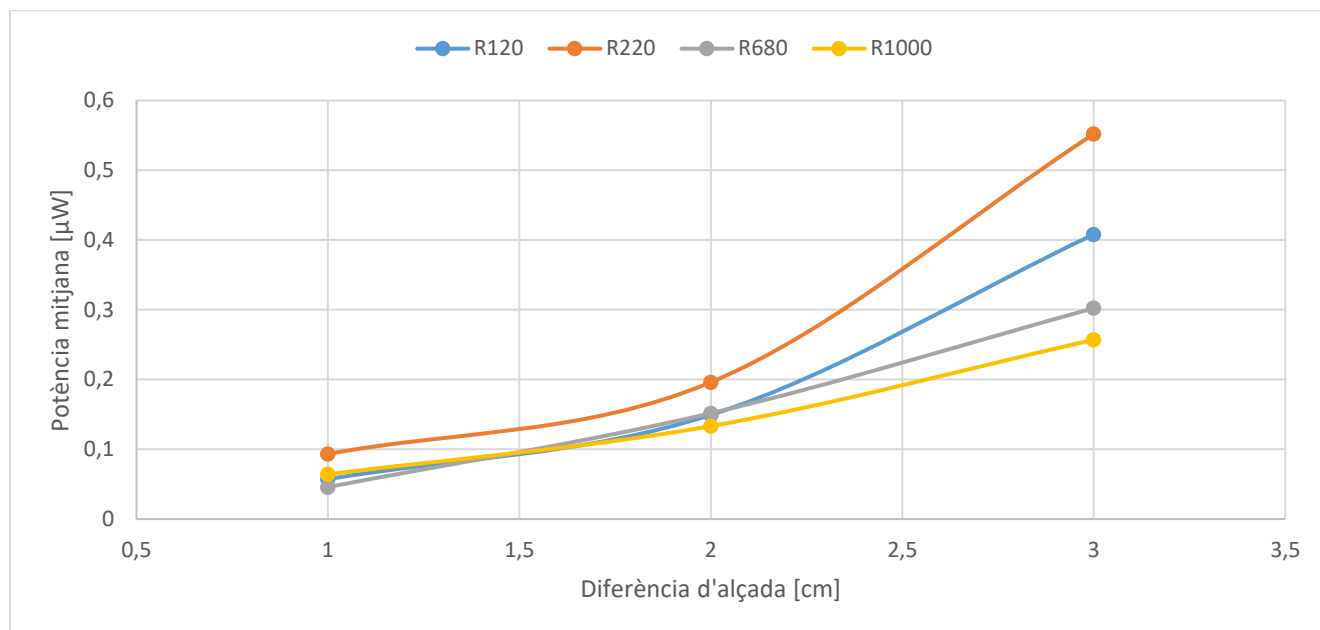


Figura 33. Potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada

7.2.3.2 Longitud 2

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 2.

Poliestirè Long 2, mètode de l'extrem lliure			
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Dif. Alçada [cm]	Potència [μW]
120	R1=0 R2=120	0,75	0,195024446
		1,5	0,751375694
		2,25	1,67741751
220	R1=0 R2=220	0,75	0,248145884
		1,5	0,859617483
		2,25	2,094618003
680	R1=0 R2=680	0,75	0,192202868
		1,5	0,763633358
		2,25	1,525214241
1000	R1=0 R2=1000	0,75	0,240210033
		1,5	0,60372875
		2,25	1,153038216

Taula 16. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure

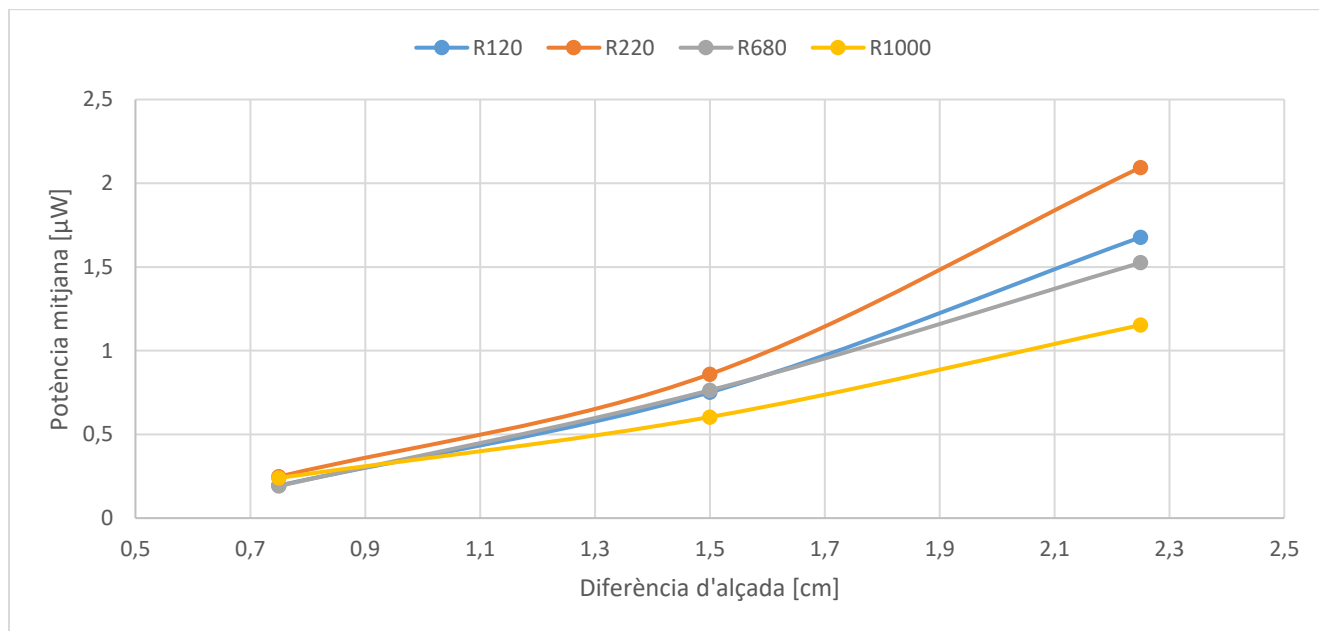


Figura 34. Potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada



7.2.3.3 Longitud 3

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 3.

Poliestirè Long 3, mètode de l'extrem lliure			
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Dif. Alçada [cm]	Potència [μW]
120	R1=0 R2=120	0,75	2,067159875
		1,5	7,93922213
		2,25	18,41117574
220	R1=100 R2=120	0,75	3,166099606
		1,5	10,18165286
		2,25	23,10781733
680	R1=560 R2=120	0,75	2,247730091
		1,5	6,415791923
		2,25	13,25749593
1010	R1=680 R2=330	0,75	0,655869719
		1,5	2,70374235
		2,25	6,209955138

Taula 17. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure

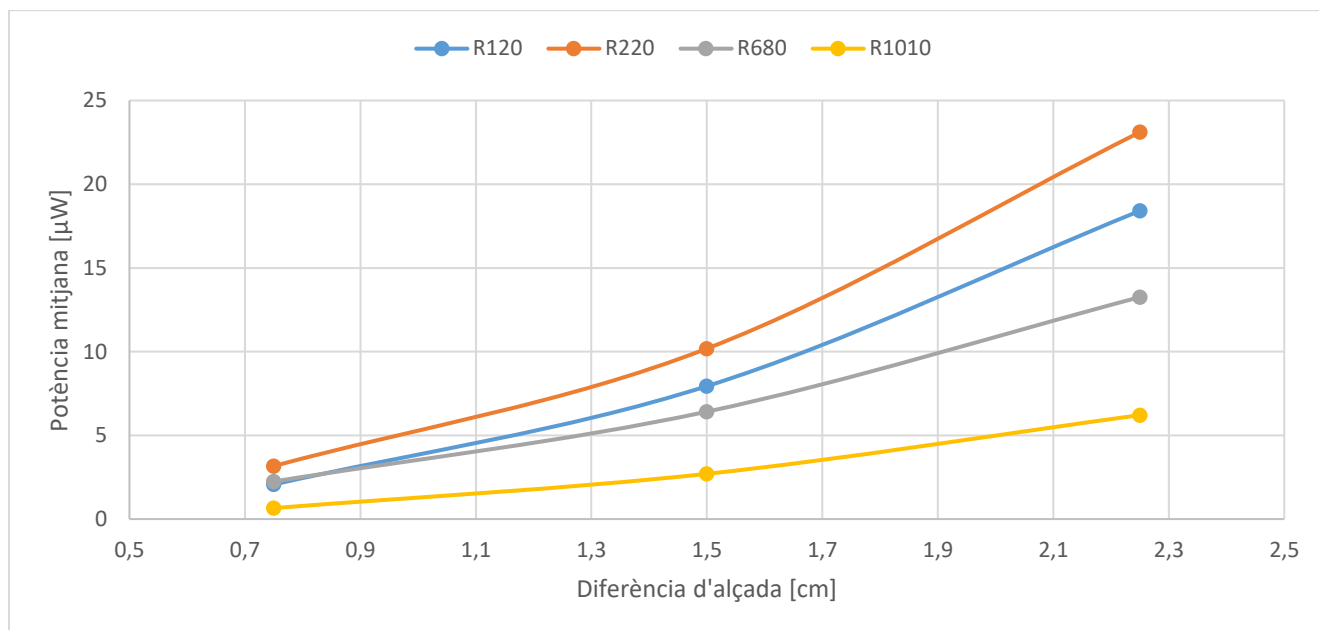


Figura 35. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada

7.2.3.4 Explicació

Es pot observar que els tres gràfics representats (Figura 33. *Potència mitjana per la primera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada*, Figura 34. *Potència mitjana per la segona longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada* i Figura 35. *Potència mitjana per la tercera longitud de la platina de poliestirè amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada*) són molt similars. En els tres es pot veure com, a mesura que la freqüència de l'excèntrica augmenta, el valor de la potència mitjana també ho fa. Això també succeeix, en major mesura, quan s'acurta la longitud de la platina.

A les gràfiques s'observa que l'ordre de la resistència consum segons la potència mitjana consumida es manté. Ordenades de major a menor són: $R_{càrrega} = 220 \text{ k}\Omega$, $120 \text{ k}\Omega$, $680 \text{ k}\Omega$ i $1 \text{ M}\Omega$ (1,01 en el cas de la longitud 3). És coherent ja que els valors de les resistències de càrrega més properes al valor de la resistència interna del piezoelèctric són les que consumeixen més potència.



7.2.4 *Platina d'alumini amb mètode de l'extrem lliure*

7.2.4.1 Longitud 1

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 1.

Alumini Long 1, mètode de l'extrem lliure			
$R_{càrrega}$ [K Ω]	Resistències [K Ω]	Dif. Alçada [cm]	Potència [μ W]
320	R1=220 R2=100	0,5	9,78949172
		1	29,44117838
		1,5	63,81093614
		2	103,9716676
510	R1=390 R2=120	0,5	6,80441616
		1	22,40016407
		1,5	43,00392186
		2	55,45423794
650	R1=470 R2=180	0,5	4,189474327
		1	13,36918444
		1,5	34,96285442
		2	60,0985559
1000	R1=820 R2=180	0,5	3,321226259
		1	10,95359718
		1,5	13,53672305
		2	32,03584114

Taula 18. Resultats de la potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure

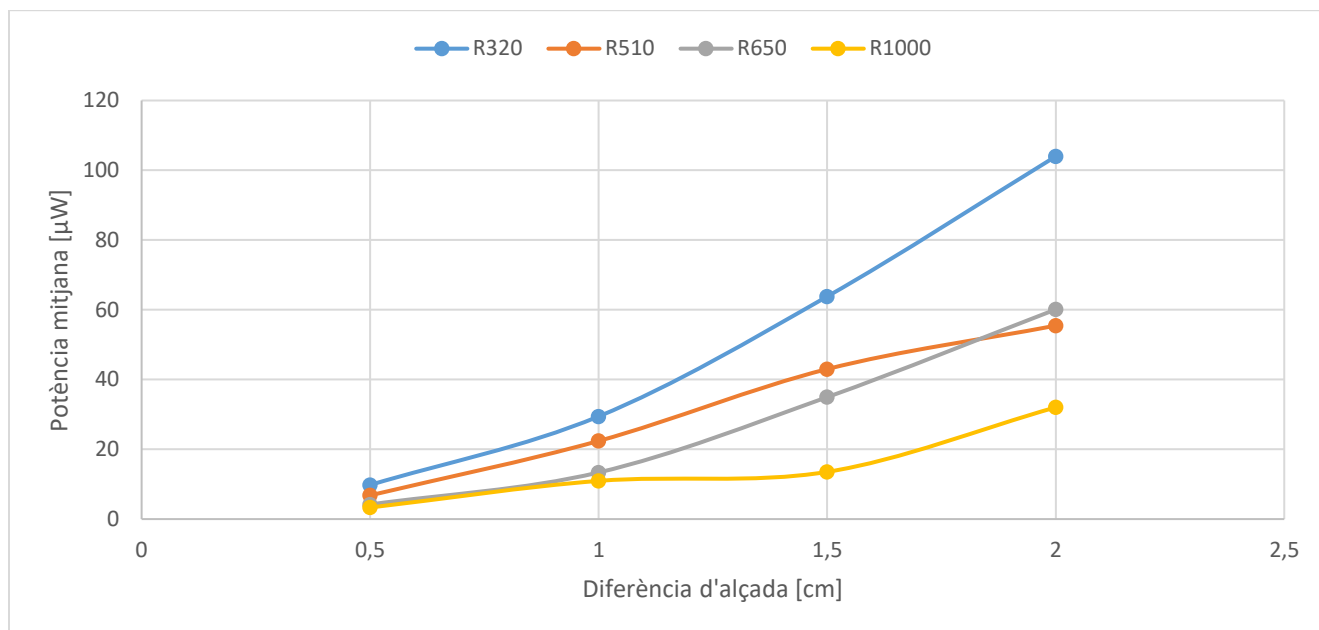


Figura 36. Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada

7.2.4.2 Longitud 2

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 2.

Alumini Long 2, mètode de l'extrem lliure			
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Dif. Alçada [cm]	Potència [μW]
230	R1=220 R2=10	0,5	47,4209195
		1	138,6543768
		1,5	273,1797197
402	R1=390 R2=12	0,5	36,42210885
		1	109,71584
		1,5	210,991617
570	R1=560 R2=10	0,5	35,30593766
		1	80,68627119
		1,5	167,9547402
838	R1=820 R2=18	0,5	18,59323516
		1	53,6221795
		1,5	117,8847963

Taula 19. Resultats de la potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure

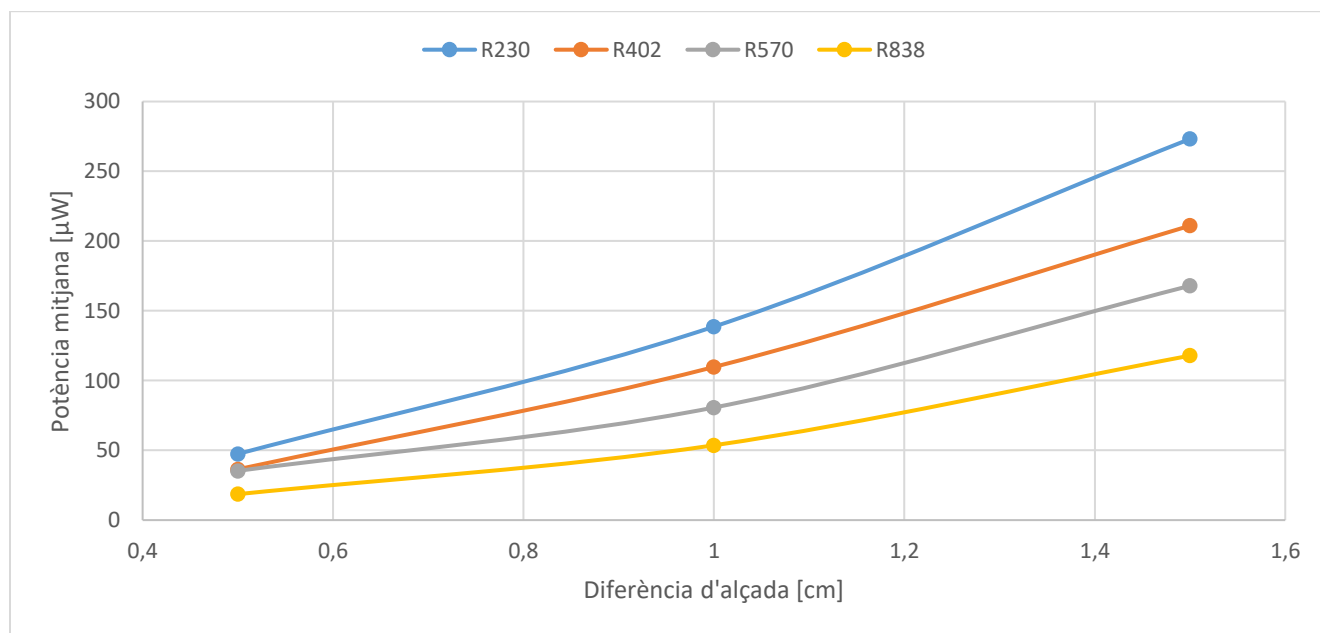


Figura 37. Potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada



7.2.4.3 Longitud 3

La taula següent mostra els resultats de la potència per la Longitud 3.

Alumini Long 3, mètode de l'extrem lliure			
R _{càrrega} [KΩ]	Resistències [KΩ]	Dif. Alçada [cm]	Potència [μW]
230	R1=220 R2=10	0,5	314,3027163
		1	591,1422739
		1,5	1102,253897
402	R1=390 R2=12	0,5	248,4171042
		1	386,3959448
		1,5	788,4154601
570	R1=560 R2=10	0,5	143,8069666
		1	372,3990281
		1,5	541,676778
838	R1=820 R2=18	0,5	83,57276902
		1	178,5733394
		1,5	304,7654187

Taula 20. Resultats de la potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure

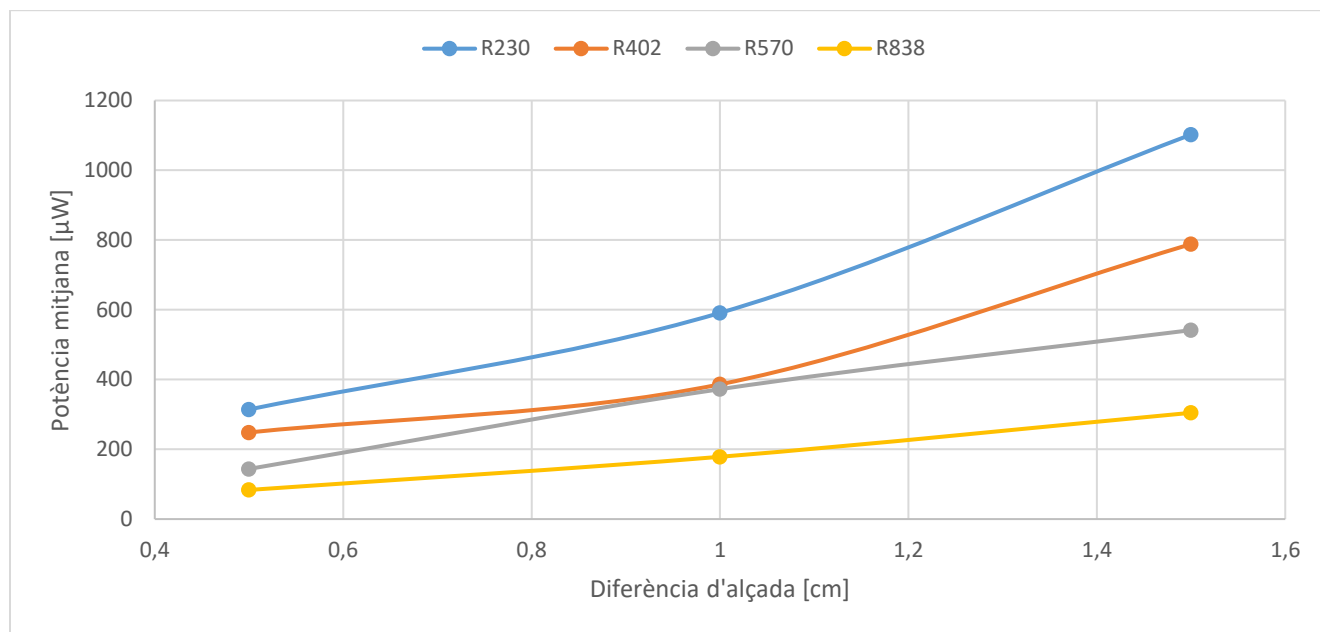


Figura 38. Potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada

7.2.4.4 Explicació

Es pot observar que els tres gràfics representats (Figura 36. *Potència mitjana per la primera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada*, Figura 37. *Potència mitjana per la segona longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada* i Figura 38. *Potència mitjana per la tercera longitud de la platina d'alumini amb el mètode de l'extrem lliure en funció de la diferència d'alçada aplicada*) són molt similars. En els tres es pot veure com, a mesura que la freqüència de l'excèntrica augmenta, el valor de la potència mitjana també ho fa. També succeeix aquesta circumstància quan s'acurta la longitud de la platina.

A les gràfiques s'observa que l'ordre de la resistència de càrrega segons la potència mitjana consumida es manté. El valor de les resistències més properes al valor de la resistència interna del transductor consumeixen una major potència i, per tant, l'ordenació a les gràfiques és coherent.

8 Conclusions

- S'ha determinat que la resistència de càrrega òptima en qualsevol cas és $R_{càrrega} = 215 \text{ k}\Omega$.
Aquest valor s'ha determinat mitjançant l'Equació 34 que estableix que la resistència de càrrega que consumeix més potència és aquella que té el mateix valor que la resistència interna del transductor piezoelèctric.
- La longitud òptima, tant per l'alumini com pel poliestirè, és la més curta pels dos mètodes utilitzats.
Per les longituds de voladís assajades i mètodes utilitzats a ambdues platines, s'ha observat que quant més curtes són, més potència genera el transductor piezoelèctric i, conseqüentment, més potència consumeix la resistència de càrrega.
- El material de la platina que fa que el transductor piezoelèctric generi més potència és l'alumini tant pel mètode de l'excèntrica com pel mètode de l'extrem lliure.
Observant els valors de la potència mitjana consumits per les diferents resistències de càrrega utilitzades, als dos mètodes utilitzats i comparant els resultats d'ambdues platines a cadascun d'ells, es pot apreciar que la platina d'alumini aporta molta més potència que la de poliestirè degut a la seva rigidesa.
- Per ambdues platines, les potències mitjanes calculades són més grans al mètode de l'excèntrica que al mètode de l'extrem lliure.
Determinar quin dels dos mètodes és el més òptim és difícil de precisar ja que a un s'aplica freqüència i a l'altre diferència d'alçada. El mètode de l'extrem lliure té un gran inconvenient i és que per calcular la potència mitjana, s'han considerat tots aquells valors de V_{R_2} que tenien un màxim, o mínim en valor absolut, en la seva respectiva oscil·lació superior al 10% del valor de V_{R_2} màxim enregistrat. Per tant, al considerar tants valors i sabent que la potència decreix amb el temps (per aquest mètode), els valors de les potències mitjanes són molt baixes.
A l'Annex I es pot observar, en molts casos, que si al mètode de l'extrem lliure només es consideressin les primeres oscil·lacions de voltatge per calcular la potència mitjana, aquesta seria major que la calculada al mètode de l'excèntrica per la mateixa platina, longitud i resistència de càrrega. Un exemple d'això és el cas de la platina d'alumini de longitud de voladís



271 mm amb una resistència de càrrega de 230 k Ω i una diferència d'alçada aplicada de 15 mm.

- La freqüència òptima és, pel cas del poliestirè, la més alta, mentre que pel cas de l'alumini depèn de la longitud del voladís i del valor de la resistència de càrrega. La diferència d'alçada òptima és per ambdós casos la més alta.

Per determinar quina és la freqüència, o diferència d'alçada, òptima per a que el transductor piezoelèctric generi més potència, s'han comparat els resultats obtinguts per la platina de poliestirè i per la platina de l'alumini tant pel mètode de l'excèntrica com pel mètode de l'extrem lliure.

Pel mètode de l'excèntrica, s'ha observat que per la platina de poliestirè, quant més freqüència aplicava l'excèntrica, més augmentava la potència mitjana (per les tres longituds de voladís estudiades), mentre que per la platina d'alumini això només es compleix per resistències de càrrega inferiors a 1 M Ω i freqüències inferiors a 7,5 Hz per la longitud 1, i per resistències de càrrega pròximes al valor òptim per la longitud 2.

Pel mètode de l'extrem lliure, s'ha observat que tant per la platina de poliestirè com per la d'alumini, quant més diferència d'alçada s'aplicava, més augmentava la potència mitjana (per les tres longituds de voladís estudiades).



9 Anàlisi econòmic

Segons la normativa de la UPC respecte el treball final de grau (TFG), cada crèdit correspon a 25 hores de treball. Per tant, com el TFG conté 12 crèdits ECTS, les hores dedicades són aproximadament 300. El sou per hora treballada serà de 30 euros, per tant, el cost total dels recursos humans és de:

Hores treballades [hores]	Sou [€/hora]	Cost [€]
300	30	9000

Taula 21. Honoraris

10 Referències bibliogràfiques

Projectes

Molina Cabrera, Alejandro, ESTUDIO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS BAJO EL PASO DE VEHICULOS, Máster universitario en Ingeniería de Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial, 2016

Pàgines web

<http://www.electrontools.com>

<https://andesmeji.wordpress.com>

<https://en.wikipedia.org>

<https://www.piceramic.com>

<http://www.nanomotion.com>